



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ DVOU PLYNŮ

MODELLING OF FLOW OF TWO GASES

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Strouhal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Špiláček

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Jiří Strouhal
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Michal Špiláček
Akademický rok:	2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Modelování proudění dvou plynů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Znalost proudění a míchání dvou plynů (spaliny, vzduch) ve spalovacích zařízeních je základem pro správné navržení takového zařízení s ohledem na minimalizaci produkce škodlivých emisí a maximalizaci účinnosti. Jednou z možností analýzy je CFD modelování těchto procesů.

Cíle bakalářské práce:

- Rešerše CFD problematiky.
- Rešerše spalovacích zařízení a vlivu přívodu spalovacího vzduchu na kvalitu spalování s důrazem na roštová ohniště.
- CFD analýza míchání dvou plynů v prostorech kotle.

Seznam literatury:

SKÁLA, Zdeněk. Termokinetika spalování. 1. vyd. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 1984, 116 s.

KOZUBKOVÁ, Milada. Modelování proudění tekutin, FLUENT, CFX. 1. vyd. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2008, 153 s. Dostupné z:
<http://www.338.vsb.cz/PDF/Kozubkova-Fluent.pdf>.

BALÁŠ, Marek. Kotle a výměníky tepla. 1. vyd. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009, 109 s. ISBN 978-80-214-3955-9

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá interakcí dvou plynů o rozdílné teplotě a složení uvnitř zplyňovací komory ZKG.

První část práce je věnována biomase jakožto obnovitelnému zdroji energie. Uvedena je definice biomasy, její rozdělení, vlastnosti a možnosti energetického využití, včetně nežádoucích produktů zpracování. Další kapitola pojednává o roštových spalovacích zařízeních; ty jsou rozděleny podle různých kritérií. Třetí část rešerše se v krátkosti věnuje metodám CFD modelování jevů vyskytujících se v ohništích roštových kotlů; jsou to turbulentní proudění, transport chemických látek a přenos tepla. Tyto metody jsou následně využity pro úlohu mísení spalovacího vzduchu a dřevoplynu uvolňovaného z plochy roštu ve zplyňovací komoře ZKG. V závěru jsou vyhodnoceny výsledky simulace.

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with interaction of two gases of different temperature and chemical composition in gasification chamber ZKG.

The first chapter of the thesis is focused on biomass as a renewable energy source. At first, there is definition of term biomass and then description of physical and chemical properties, by-product and basic types of biomass. There are also described the processes of pyrolysis and combustion. The second chapter is focused on different types of combustion and gasification devices. The third chapter of theoretical research briefly introduces basic methods of CFD modeling of processes in gasification chamber including turbulent flow, transport of chemical species and heat transfer. These methods are used for case mixing of combustion air and wood gas in combustion chamber ZKG. In conclusions are evaluated the results of simulation.

Klíčová slova

biomasa, zplyňování, CFD, spalovací vzduch, dřevoplyn, proudění, směs plynů

Keywords

biomass, gasification, CFD, combustion air, woodgas, flowing, gas mixture

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

STROUHAL, J. *Modelování proudění dvou plynů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 56 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Špiláček.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Modelování proudění dvou plynů* vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Jiří Strouhal

PODĚKOVÁNÍ

V první řadě bych rád poděkoval svému vedoucímu Ing. Michalu Špiláčkovi za možnost práce na tomto tématu a za odborné rady, zejména v oblasti CFD. Velmi si cením jeho vstřícnosti, ochoty pomoci při práci v softwaru COMSOL Multiphysics. Dále chci poděkovat Ing. Marku Balášovi, Ph.D za odbornou radu a poskytnutí studijních materiálů.

Velké díky patří mým blízkým za všestrannou podporu a motivaci.

OBSAH

ÚVOD	11
1. BIOMASA	12
1.1. Vlastnosti	13
1.1.1. Hrubý rozbor	13
1.1.2. Energetické parametry	14
1.2. Termická zpracování	15
1.2.1. Spalování	15
1.2.2. Zplyňování	15
1.2.3. Pyrolýza	15
1.3. Biochemická konverze	16
1.4. Spalování biomasy	16
1.5. Produkty spalování	17
1.5.1. Popel	17
1.5.2. Spaliny	18
1.6. Vznik nežádoucích produktů	18
1.6.1. Síra	18
1.6.2. Dusík	19
1.6.3. Problém nedokonalého spalování	19
1.6.4. Spalování za přebytku vzduchu	20
2. ROŠTOVÁ SPALOVACÍ ZAŘÍZENÍ	21
2.1. Průběh spalování na roštech	21
2.1.1. Průběh spalování na roštu	21
2.1.2. Vysoušení	22
2.1.3. Zápal paliva	22
2.2. Druhy roštů	22
2.2.1. Kotle s pevným roštem	23
2.2.2. Kotle s mechanickým roštem	24
2.3. Pohazovací zařízení	26
2.4. Spalovací vzduch	26
2.4.1. Rychlost a množství spalovacího vzduchu	27
2.4.2. Dělení přiváděného vzduchu	28
2.4.3. Teplota a předešívání	28
3. MODELOVÁNÍ ANIZOTERMNÍHO PROUDĚNÍ DVOU PLYNŮ	28
3.1. Stacionární turbulentní proudění	28
3.1.1. Statistické modely	29
3.2. Transport příměsí	30
3.3. Přenos tepla	30
4. TECHNICKÉ PARAMETRY ZPLYŇOVACÍ KOMORY	31
5. ANALÝZA ANIZOTERMNÍHO PROUDĚNÍ DVOU PLYNŮ	32
5.1. Definování výpočetní oblasti	32
5.1.1. Volba a úpravy geometrie	32
5.1.2. Rošt	34

5.1.3.	Sekundární vzduch	35
5.1.4.	Tepelné ztráty nadroštové části	35
5.1.5.	Vliv tíhového pole Země	36
5.2.	Výsledky analýzy proudění v softwaru COMSOL Multiphysics.....	36
5.2.1.	Rychlost.....	36
5.2.2.	Tlak.....	41
5.2.3.	Teplota a tepelné ztráty stěnami komory	43
5.2.4.	Hmotnostní zlomek dřevoplynu	46
5.3.	Obecné zhodnocení výsledků	50
6.	ZÁVĚR	51
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	52
	SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ	54
	POUŽITÉ ZKRATKY A SYMBOLY	55

ÚVOD

Biomasa je významným zdrojem energie (zpravidla tepelné) v domácnostech i průmyslu. Umožňuje využít energetické zásoby uložené v živých organismech a to buď rostlinách, které se za tímto účelem pěstují, dále z odpadů ze zemědělské výroby, odpadů komunálních aj. Velkou výhodou biomasy oproti fosilním palivům je fakt, že nenarušuje bilanci uhlíku v přírodě, neboť po spálení biomasy (případně produktů z ní vytvořených) je uhlík v podobě CO_2 opět biomasou absorbován.

Biomasu lze zpracovávat v zařízeních různé konstrukce, a to několika typy procesů (případně jejich kombinací). Jedním ze způsobů získání energie je zplyňování tj. rozklad původní hmoty paliva na energeticky lépe využitelné produkty, případně alespoň zajistit snazší transport těchto produktů. Po promísení s okysličovadlem, kterým je zpravidla vzduch, jsou tyto spalovány. Z ekonomických i ekologických důvodů je snahou výrobců těchto zařízení zajistit co nejdokonalejší spalování produktů zplyňování, jednak pro maximální využití energie v palivu; dále z důvodu omezení vzniku nežádoucích produktů, jako jsou CO , NO_x , SO_2 apod.

Pro účely optimalizace zařízení je proto důležité znát poměry uvnitř zplyňovacích komor kotlů pro zpracování biomasy. Jednou z možností je využití CFD simulací. Model proudění plynů ve zplyňovací komoře se zabývá mísením plynů v nadroštové části komory. Zahrnuje jevy, jako jsou turbulentní proudění plynu v tíhovém poli, difúze a všechny druhy přenosu tepla. Výsledky simulace a jejich zhodnocení mohou být dále podkladem pro další konstrukční návrhy a úpravy zplyňovacích zařízení.

1. Biomasa

„*Biomasa* se rozumí biologicky rozložitelná část produktů, odpadů a zbytků biologického původu ze zemědělství (včetně rostlinných a živočišných látek), z lesnictví a souvisejících průmyslových odvětví včetně rybolovu a akvakultury, jakož i biologicky rozložitelná část průmyslových a komunálních odpadů.“ [1]

Tato definice biomasy zahrnuje organickou hmotu pro energetické účely získanou buďto záměrně nebo jako vedlejší produkt z různých zemědělských a průmyslových odvětví. Je vhodné rozlišovat biomasu *rostlinného* a *živočišného* původu [2]; dále lze uvést podrobnější rozdělení podle způsobu získávání:

- a) *Cílené pěstovaná biomasa* – plodiny a dřeviny primárně určené k energetickému využití (jejich nadzemní část), popřípadě upraveny pro přepravu ke spotřebiteli; ušlechtilá paliva vyrobená z biomasy
- b) *Odpady z rostlinné výroby* – vedlejší produkty (sláma, seno, ostatní rostlinná pletiva), znehodnocené produkty určené původně k jiným účelům (zrní, kompost, ...), zbytky po údržbě veřejné zeleně, zbytková hmota z těžby dřeva a použité dřevo, rostlinné tuky, odpady z destilace alkoholu aj.
- c) *Odpady z živočišné výroby* – tuky, masokostní moučka, exkrementy, hnůj, kejda, odpady z potravinářského průmyslu (kaly z čištění tkání, kafilerní tuk, ...) aj.
- d) *Průmyslové odpady* – vlákninové kaly z papírenského průmyslu, druhotně nevyužitý papír a lepenka, zbytková dřevní hmota, zbytková hmota z textilního a kožedělného průmyslu aj.
- e) *Komunální odpad* – organické odpady z domácností, kaly z čistíren odpadních vod aj. [3]

Zmíněnou rostlinnou biomasu můžeme dále rozdělit do následujících 2 kategorií podle typu rostlin:

- *Dřeviny*, tj. „dřevní biomasa ve formě štěpek, pilin, hoblin, mající původ v dřevozpracujícím průmyslu a v lesnictví („odpadní“ biomasa), popřípadě dřevní biomasu získanou z cíleně pěstovaných energetických dřevin“ [4]
- *Stébelniny*, tj. „rostlinná biomasa ve formě balíků ze slámy zbylé po sklizni zrna („odpadní“ biomasa) nebo rostlinná biomasa získaná z cíleně pěstovaných energetických rostlin“ [4]

Rozhodujeme-li se mezi jednotlivými typy tuhých paliv, s přihlédnutím k výsledné bilanci uhlíku má biomasa velký ekologický význam. Při spalování např. fosilních paliv jako je uhlí a ropa, se do ovzduší uvolňuje značné množství tohoto prvku, který byl v dávné historii Země uložen do zásob mimo žijící organismy a takřka tehdy „zmizel“ z biosféry. Spalováním těchto zásob – tedy fosilních paliv – v dnešní době se tak do biosféry navrací uhlík, který se zde po několika geologických obdobích nevyskytoval, a současné organismy jsou nuceny se s tímto v různé míře vyrovnávat. Naproti tomu spalováním biomasy se do ovzduší uvolní pouze takové množství CO₂, jaké bylo vázáno v současných organismech a které jimi může být opět zpracováno. Celkové množství uhlíku v biosféře zůstává tudíž při spalování biomasy konstantní [5].

1.1. Vlastnosti

1.1.1. Hrubý rozbor

Stejně jako u ostatních tuhých paliv i v případě biomasy uvažujeme tři základní složky určující užitečný obsah (tj. kolik procent hmoty paliva se využije během spalování). Těmito složkami jsou *hořlavina*, *popelovina* a *voda (vlhkost)*. [2]

Přimísená voda	Surové uhlí		
	voda W_r	popeloviny A^r	hořlavina h
balast		prchavá hořlavina	tuhá hořlavina
		bezvodé uhlí (sušina)	
spálením vznikne:			
vodní pára	tuhé zbytky = škvára/struska, popílek		spaliny

Tab. 1 - Hrubý rozbor tuhých paliv [2]

- *Vlhkost* je významnou součástí hmoty biomasy a obecně většiny tuhých paliv. Její význam spočívá v negativním ovlivnění procesu spalování. V první řadě je třeba odstranit ji z hmoty paliva, což znamená nutnost dodávání tepla ohřev a změnu fáze. Dále odpařená voda navyšuje výsledný objem spalin – potřebujeme tedy zvýšit výkon spalinových ventilátorů. V neposlední řadě, klesne-li teplota spalin pod rosný bod, dochází ke kondenzaci vodní páry na stěnách kotle a následné korozi [2]. Nelze však volit ani palivo s příliš nízkým obsahem vody, neboť významné množství tepla je namísto k odparu vody využito k zapalování další hmoty paliva a významně se tak urychlují řetězové reakce. Příliš vysušené palivo tedy vyžaduje plynulejší přikládání. Voda má rovněž význam jako reaktant při procesech během zplyňování.

Voda obsažená v palivu se dělí do několika typů podle původu a způsobu navázání na palivo: [6]

- *Přimísená voda* se do paliva dostává během transportu či skladování. Odděluje se prostým odkapáváním či odstředováním a nepovažuje se za původní součást paliva.
- *Hrubá voda* je složka vlhkosti zjišťovaná jako úbytek hmotnosti paliva sušením při 20°C (i vyšší) a relativní vlhkosti 50 %.
- *Zbytková voda* je vázána v kapilárách a pórech paliva zbaveného hrubé vody. Určuje se laboratorně jako úbytek hmotnosti vzorku paliva sušením ve vzdušné sušárně při teplotě 105-110°C. V technické praxi se běžně určuje součet zbytkové i hrubé vody, tzv. *veškerá voda*.
- Zbývající složky jsou voda *odkludovaná*, malé množství zahrnované do prchavé hořlaviny a voda *hydrátová*, vázaná v minerálech paliva (popelovina).
- *Popelovina* se skládá z anorganických látek (křemičitany, uhličitany, sírany apod.), jež jsou obsaženy jednak v původní hmotě paliva, dále pak se mohou vyskytovat ve formě nečistot přimísených k palivu během jeho transportu nebo skladování (hlína, kameny, písek, prach, ...). Po průchodu spalovacím procesem vytváří tuhý zbytek, tj. popel. Pro hmotu popele se stanovují tzv. charakteristické teploty, vypovídající

o fázovém složení a chování popele. Tyto teploty lze určovat pomocí válečkové metody nebo Segerovy metody jehlanů. Jde o teploty *měknutí* (t_a), *tavení* (t_b) a *tečení* (t_c). [2]

palivo	t_a [°C]	t_b [°C]	t_c [°C]
dřevo	1255	1280	1320
šťovík	1150	1170	1200
chrastice	860	905	980
seno	1080	1170	1200
hnědé uhlí	1400	1470	> 1500

Tab. 2 - Charakteristické teploty popele vybraných paliv [7]

- *Hořlavina* je nejdůležitější složkou paliva. Právě tato část paliva je hlavním zdrojem tepla pro veškeré reakce probíhající v ohništi. Převážnou část prvkového obsahu tvoří uhlík, vodík, kyslík, síra a dusík, z toho první dva jsou z hlediska uvolňovaného tepla nejdůležitější. Odlišujeme dvě složky hořlaviny – prchavou a tuhou (koks). [8]

Prchavá hořlavina sestává z uhlovodíků, jež jsou uvolňovány při zahřívání paliva, což napomáhá a stabilizuje proces hoření. Množství prchavé hořlaviny se stanovuje z úbytku hmotnosti analytického vzorku žíhaného v uzavřeném kelímku. Co do množství a výhřevnosti mají tyto prchavé složky významný vliv na zápalnou teplotu a reaktivitu paliva. [8]

Palivo		Podíl prchavé hořlaviny
Fosilní paliva	Antracit	6,4
	Černé uhlí	40,2
	Hnědé uhlí	40,8
Biomasa	Sláma	80
	Dřevo	75
	Dřevěný odpad	72
	Piliny	78,6

Tab. 3 - Obsah prchavé hořlaviny u vybraných paliv [2] [9]

Tuhá hořlavina (koks) je tvořena zbylým uhlíkem po vypaření a vyhoření prchavých složek. [2] Jelikož je převažující složkou vždy tuhý uhlík (nezávisle na druhu paliva), její výhřevnost odpovídá hodnotě 33,9MJ/kg [8]

1.1.2. Energetické parametry

Podle [10] jsou pro hodnocení tuhých paliv pocházejících z biomasy vybrány tři parametry, obecně platné pro tuhá paliva:

- Spalné teplo* Q_s – teplo v kJ potřebné k dokonalému spálení 1 kg paliva s konečnou teplotou spalin 20°C. Voda složená z odpařené vlhkosti a vody vzniklé během spalování přitom zkondenzuje.
- Výhřevnost* Q_r^i – je definována podobně jako spalné teplo, avšak nedochází ke kondenzaci vody ve spalinách. Její hodnota se počítá jako rozdíl spalného tepla Q_s a výparného tepla vody. Už z definice silně závisí na vlhkosti paliva a kromě toho i na obsahu H_2 v surovém palivu.

- c) *Entalpie spalin* I_{sp} – teplo odnášené spalinami pryč z prostoru kotle, případně teplo spalinám odebírané. Nejde o charakteristiku samotného paliva, je však důležitá pro celkové hodnocení kvality spalování [2]

1.2. Termická zpracování

Jednoznačně nejstarším způsob, jak využít chemickou energii vázanou v rostlinné, příp. živočišné hmotě a přeměnit ji na teplo, je přímé spalování. Co se týče účinnosti a ekonomičnosti, je však vhodnější palivo zpracovat na energeticky lépe využitelné produkty.

1.2.1. Spalování

Spolu s popisem výsledných produktů a problémů se spalováním spojených bude tato problematika popsána podrobněji v dalších kapitolách. V krátkosti lze uvést, že spalování sestává z více fází, kde nejdůležitějšími procesy jsou hoření prchavých látek a tuhé, na uhlík bohaté fáze. Kusy surového paliva jsou po celou dobu vystaveny kyslíkaté atmosféře ohniště a po dosažení teploty vznícení dochází k hoření uvolněných prchavých složek a posléze i tuhé fáze. [11]

1.2.2. Zplyňování

Zplyňování lze uvést jako samostatný proces, případně jako proces doprovázející spalování a naopak – spalování může provázet zplyňování (případ autotermního zplyňování). V průběhu zplyňování prostřednictvím řady poměrně jednoduchých chemických reakcí, tvořících dohromady složitý termochemický proces, získáváme z organických látek obsažených v biomase nízkovýhřevný plyn, tj. směs CH_4 , CO , CO_2 , H_2 , H_2O a N_2 . Pro zplyňování volíme vyšší teploty v rozsahu $750\text{--}1000^\circ\text{C}$. Charakter celého procesu je silně endotermní, je zapotřebí tepelný zdroj. Podle způsobu dodávky tepla rozlišujeme zplyňování:

- *autotermní* – získá teplo částečnou oxidací zplyňovaného materiálu (vzduchem, kyslíkem, popř. směsí obou)
- *alotermní* - z externích zdrojů [12]

Výhřevnost plynu je silně ovlivněna použitým zplyňovacím médiem. Použijeme-li směs O_2 a vodní páry, získáme plyn o výhřevnosti $10\text{--}18 \text{ MJ/m}^3_n$. Častější je použití vzduchu, někdy se zvýšeným obsahem O_2 . Výhřevnost v tomto případě klesá na $4\text{--}7 \text{ MJ/m}^3_n$ v důsledku naředění vznikajícího plynu dusíkem (50 % objemu) a oxidem uhličitým (cca 10 % objemu). [11]

1.2.3. Pyrolýza

Zahříváme-li palivo bez přístupu kyslíku, dochází ke štěpení vazeb organických molekul materiálu biomasy. Jde rovněž o první krok ve zplyňovacích a spalovacích procesech. Hlavním účelem pyrolýzy je výroba *pyrolýzních olejů*, sloužících jako kapalná paliva pro výrobu tepla nebo elektrické energie. Jejich výhodou oproti tuhým palivům je snadnější transport k odběratelům; pyrolýzní stanice jsou tak méně závislé od místa spotřeby a lze je zakládat blíže zdrojům potřebné biomasy. [12]

Samotný proces má endotermický charakter, kde se dodaná energie ukládá do chemických vazeb nově vznikajících molekul. V průběhu řady chemických reakcí, tj. *primárních* (štěpení vazeb C-C, C-O, C-H) a *kondenzačních* (alkylace, cyklizace, vznik aromátů, kondenzovaných aromátů až koksu) dostáváme produkty ve 3 skupenstvích:

- a) *Pyrolýzní plyn* – převážně obsahující CH_4 , H_2O , CO , CO_2 , H_2
- b) *Dehty* – bio olej
- c) *Pyrolýzní koks* [11]

Ačkoli vznikají zpravidla všechny typy produktů, jejich vzájemný poměr se liší v závislosti od teplot a doby trvání celého procesu. Dále záleží na původu a vlastnostech konkrétního druhu biomasy, jako je vlhkost, chemické složení a velikost kusů (částic). Dalšími faktory jsou složení inertní atmosféry, rychlosti ochlazování odváděných produktů, doby jejich zdržování v reaktoru a přítomnosti tuhých inertních materiálů (katalyzátorů). [11]

typ procesu	zdržná doba	teplota [°C]	výsledný podíl [%]		
			koks	dehet	plyn
Zplyňování	Dlouhá	800-1000	10	5	85
Rychlá pyrolýza	Velmi krátká	500-600	12	75	13
Karbonizace	Velmi dlouhá	400-500	35	30	35

Tab. 4 - Procentuální podíl výsledných produktů pyrolýzy v závislosti od podmínek procesu [11]

1.3. Biochemická konverze

Tento způsob zpracování je vhodný pro druhy biomasy s vysokým podílem vlhkosti. To se týká zejména energetického využití odpadních vod a kalů, případně cíleně pěstovaných rostlin na výrobu *bioetanolu*. V základu je možné dvojí zpracování:

- Anaerobní vyhnívání* – mikroorganismy za nepřístupu vzduchu rozkládají organické látky, výsledkem je bioplyn (CH_4 , CO_2 , stopově další plyny)
- Fermentace* – kvasinky přeměňují rostlinný materiál na CO_2 a alkoholy (nejvýznamnější etanol, dále metanol, aceton, ...) [13]

1.4. Spalování biomasy

Spalováním obecně je myšlen fyzikálně chemický děj s uvolňováním tepla. Palivo a okysličovadlo vzájemně reagují a dávají vzniknout výsledným produktům, přičemž:

- Palivo* je jakákoliv látka reagující s okysličovadlem vykazující dostatečnou aktivitu okysličovacích pochodů a dostatečnou výhřevnost, tj. při vhodné koncentraci paliva i okysličovadla probíhá proces bez potřeby dodávky energie z okolí.
- Okysličovadlo* je látka obsahující kyslík oxidující látky paliva. U spalování biomasy i dalších bývá převažujícím okysličovadlem vzduch.

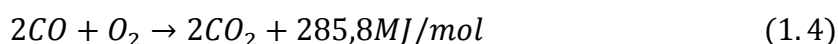
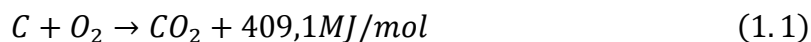
Obě výše popsané pracovní látky označujeme rovněž jako *vstupní látky* spalovacího procesu.

- Produkty spalování* vznikají reakcí vstupních látek. Jde o plynné spaliny, popřípadě tuhé či kapalné zbytky po spálení. [2]

Samotný proces lze spustit dvěma způsoby. V prvním případě stačí přímý kontakt vstupních látek, jde o tzv. *samovznícení*. V případě druhém je nutno nejprve dodat jistou energii pro zapálení směsi okysličovadla a paliva, což v praxi znamená například přiložení malého množství již hořících kusů paliva. Dále se již děj obejde bez vnější dodávky energie, neboť jako iniciátor pro zapálení jedné části směsi slouží teplo uvolněné hořením jiné části. K přerušení hoření dojde v případě, kdy přestaneme dodávat nové palivo, okysličovadlo nebo ochladíme směs natolik, že dojde k přerušení řetězové reakce. [2]

Celkový zisk energie nezávisí na jednotlivých reakcích během spalování, ale pouze na tom, jaké pracovní látky do procesu vstoupily a jaké produkty z něj vystoupily – tzv. *Hessův zákon*. [2] Uvedeny jsou 3 prvky, jejichž oxidace je zdrojem energie během spalování:

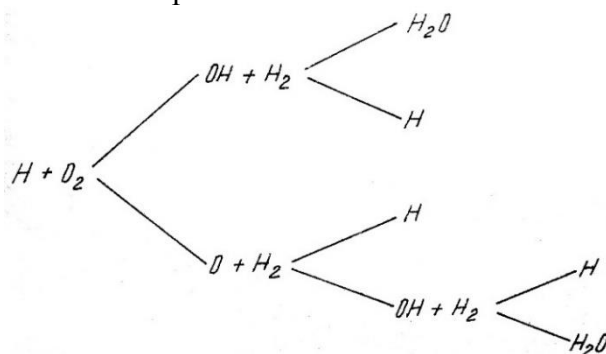
- a) *spalování uhlíku na oxid uhličitý* – při hoření uhlíku vznikají složité komplexy C_xO_y , které se následně rozpadají až na CO_2 a CO , který opět vstupuje do reakce. Při jistých teplotách dochází i k reakci uhlíku a CO_2 : [14]



- b) *spalování vodíku na vodní páru* – jde o typický příklad rozvětvené řetězové reakce zahrnující následující: [14]

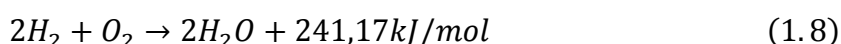


Tyto děje lze rovněž znázornit pomocí schématu:



Obr. 1 - Řetězová reakce hoření vodíku [14]

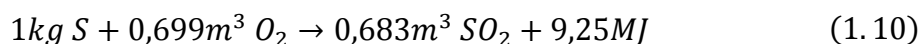
Pro znázornění energetické bilance lze uvést tento stechiometrický vztah, hodnoty jsou přepočteny na 1 mol plynného vodíku: [2]



- c) *spalování síry na oxid siřičitý* – při této oxidaci se oproti vodíku a uhlíku uvolňuje méně tepla (vztaženo na 1 kg); význam síry je spíše ekologický než energetický. [2]



Pro vyjádření množství tepla vztaženého na 1 kg síry upravíme vztah (1.9) na tvar: [2]



1.5. Produkty spalování

1.5.1. Popel

Množství vzniklého popela je jedním z faktorů vypovídajících o jakosti konkrétního paliva a jeho množství A se zjišťuje laboratorní zkouškou. Je třeba zdůraznit, že ačkoli jsme mohli stanovit obsah popelovin M_p v palivu, množství A popela se liší a jeho hodnotu zjistíme přepočtem pomocí vztahu: [8]

$$M_p = f \cdot A \quad [kg/kg] \quad (1.11)$$

kde f je *popelový faktor*, stanovený pro jednotlivé druhy paliv. [8]

V laboratorních podmínkách dochází k přeměně popelovin v popel, při spalování v roštovém ohništi vzniká jednak popílek unášený spalinami, škvára a část nespáleného paliva odchází v podobě propadu skrze mezery mezi roštnicemi. [8]

Jak bylo výše zmíněno, u popele je důležité stanovení *charakteristických teplot* t_a , t_b , t_c . Dále je žádoucí znát jejich chemické složení. Výsledky rozboru popele z dřevní štěpky a obilné slámy ze Žlutické výtopny provedly Centrální laboratoře VŠCHT Praha. V tabulce 3 je uveden výběr provedeného rozboru: [15]

oxid/prvek	CaO	SiO ₂	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	P ₂ O ₅	SO ₃
prům. obsah [hmot. %]	33,21	28,87	12,63	6,41	4,71	3,44	2,77	2,56

Tab. 5 -Výběr výsledků rozboru popele Žlutické výtopny [12]

Z rizikových prvků lze uvést Zn a Cu vyskytující se řádově ve stovkách mg/kg, též byl zjištěn obsah As, Pb a dalších. [15]

1.5.2. Spaliny

Tyto plynné produkty spalování jsou důležité z hlediska tepelné energie odnášené z ohniště. Toto teplo mohou předávat např. cirkulující vodě v tepelném výměníku nebo přiváděnému spalovacímu vzduchu. Spaliny rovněž obsahují teplo potřebné k udržení dostatečně vysoké teploty v ohništi a tudíž zajištění co nejdokonalejšího spalování. Proto namísto přímého odtahu do komína je při návrhu kotle lepší volit nejprve odtah směrem dolů, tj. *svislý pád*, kdy nejteplejší spaliny zůstávají v prostoru kotle a chladnější klesají níže, kde jsou odsávány k výměníku a dále do komína. [16]

Co do fázového složení jde zejména o plynné složky. Kromě nich obsahují spaliny rovněž pevné částice popílku a v případě poklesu teploty pod rosný bod dochází i ke kondenzaci vodní páry unikající z paliva, popřípadě vody přivedené spalovacím vzduchem či vzniklé během hoření. [2]

Pro výpočet minimálního objemu spalin, není-li známo prvkové složení paliva, lze stanovit přibližnou hodnotu platící pro normální fyzikální podmínky – tzv. Rosinovy vztahy: [2]

$$V_{sp\ min} = 1,375 + 0,95 \cdot \frac{Q_i^r}{4187} \quad [m^3_{VZ}/kg] \quad (1.12)$$

kde Q_i^r je výhřevnost paliva

Pro přesnější výpočet při provedeném prvkovém rozboru za předpokladu obsahu CO₂, N₂, SO₂, Ar a vodní páry lze využít vztahy dle [2].

1.6. Vznik nežádoucích produktů

1.6.1. Síra

Síra obsažená v palivu se projevuje z hlediska korozivního a ekologického. Její energetický význam je zanedbatelný vzhledem k jejímu procentuálnímu obsahu v palivu a nižší hodnotě spalného tepla. V případě vzniku SO₂ tento způsobuje korozi vnitřních částí kotle na straně spalin a zároveň i snížení charakteristických teplot popele [2].

V kapitole 1.2 jsme rozlišovali několik způsobů energetického využití biomasy. V případě zplyňování biomasy síra obsažená v palivu přechází v redukčním prostředí do formy H₂S. Je-li biomasa spalována, dochází k hoření síry dle vztahu (1.10) a vzniká SO₂.

V případě hnědého uhlí ze severočeských pánví se obsah síry pohybuje v rozmezí 40-79 hmot.%. [8]. U biomasy je podíl výrazně nižší, lišící se podle původu. Například u pšeničné slámy z okolí Plzně byl zaznamenán obsah síry 1,46 hmot. %. V případě popela z tzv. „bílé“ štěpky, tj. dřevní štěpky obsahující minimální množství kůry, se obsah síry v podobě SO_3 pohyboval okolo 2 hmot.%. [4]

Obsah síry se udává dvěma způsoby, a to buď v podobě výše použitého poměrného obsahu (hmot. %), který je však možno vztahovat na jednotku výhřevnosti, tzv. *měrná (specifická) sirnatost* S_{spf} , definovaná vztahem (1.13) [8]

$$S_{spf} = 1000 \frac{S_t^r}{Q_i^r} \quad [g/MJ] \quad (1.13)$$

kde S_t^r je obsah síry [kg/kg] a Q_i^r [MJ/kg] je výhřevnost paliva.

1.6.2. Dusík

Dusík ve spalínách bývá obsažen ve formě oxidů dusíku NO_x , nejčastěji jako směs dvou oxidů NO a NO_2 , ze kterých NO výrazně převažuje, nicméně NO_2 je mnohem toxičtější. Pro spalování (uhlí) se teoretický objem dusíku stanovuje ze vztahu (1.14) [8]

$$O_{N_2} = 0,78 O_{VZ} + 0,8 \frac{N^r}{100} \quad [m_N^3/kg] \quad (1.14)$$

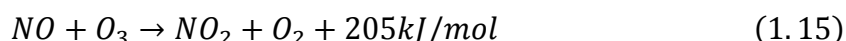
kde O_{N_2} [m_N^3/kg] je teoretický objem dusíku ve spalovacím vzduchu a N^r [hmot. %] je obsah dusíku v původním palivu. [8]

Vznik oxidů dusíku je možný třemi způsoby přeměnou jak vzdušného, tak palivového dusíku. Poměr příspěvků jednotlivých způsobů je dán podmínkami spalování a druhem paliva:

- Termické NO_x – mechanismus vychází z náhrady vzdušného dusíku molekulami kyslíku. Podmínkou jsou dlouhé prodlevy při teplotách větších než 1400 °C.
- Promptní NO_x – náhrada molekul vzdušného dusíku radikály CH_i s následným vznikem HCN a postupnou oxidací až na NO.
- Palivové NO_x – dusíkaté sloučeniny vázané v palivu reagují s radikály na HCN, dále na NH_i , které při reakci se vzdušným kyslíkem vytváří molekuly NO, popřípadě jsou redukovány na N_2 . [8]

Obsah dusíku v biomase se u českých černých uhlí pohybuje v rozmezí 1,1-1,9 hmot. %, pro hnědá činí 0,7-1,6 hmot. %. [8] Pro biomasu jako například dřevo listnaté i jehličnaté činí obsah 0,6 hmot. % hořlaviny, pro obilnou slámu 0,51 hmot. % hořlaviny. [2]

Nepříznivě se oxidu dusíku projevují vytvářením tzv. *fotochemického smogu*. Ten vzniká reakcí NO_x s těkavými organickými látkami, nespálenými uhlovodíky aj. Látky obsažené ve smogu mají karcinogenní účinky, vyvolávají slzení, dýchací obtíže a snížení imunity. [17] Při reakci NO s atmosférickým ozonem navíc vzniká toxičtější NO_2 dle rovnice (1.15) [8]

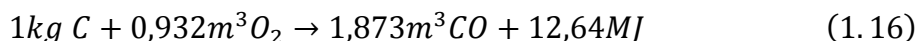


1.6.3. Problém nedokonalého spalování

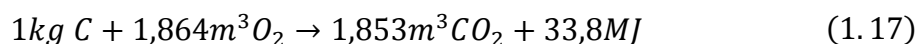
Nedokonalým spalováním nazýváme situaci, kdy palivo prošlo procesem hoření, avšak spaliny odcházející z ohniště stále obsahují hořlavé složky. Jednou z těchto složek je CO, který vzniká jako produkt hoření pevného uhlíku a jež může být dále spalován na CO_2 .

Dále sem patří nedopal tvořený složkami prehavé hořlaviny či plynů vznikajících jako produkty zplyňování paliva. [2]

Nedokonalé spalování uhlíku na oxid uhelnatý je možno znázornit stechiometrickým vztahem: [2]



Pro srovnání je uveden vztah pro dokonalé spalování: [2]



Ze vzájemného srovnání vztahů (1.16) a (1.17) vyplývá, že při spalování na oxid uhelnatý je sice třeba polovičního množství kyslíku, avšak množství uvolněné energie je téměř třikrát nižší. CO obsažený ve spalinách tudíž představuje problém nejen z hlediska své toxicity, ale i z důvodu energetických ztrát a celkové snížení účinnosti spalovacího procesu. [2]

1.6.4. Spalování za přebytku vzduchu

Pro omezení emisí CO i nedopalu prchavé hořlaviny je třeba zajistit dostatečný přísun kyslíku. Jelikož není možno zajistit dokonalé mísení plynů v ohništi, nestačí přivádět pouze teoretické množství kyslíku vyplývající z výše uváděných stechiometrických vztahů a je třeba přivádět množství větší. Tento přebytek kyslíku (resp. vzduchu) nelze volit libovolně velký, neboť při velkém objemu přiváděného vzduchu by docházelo k nežádoucímu navýšení objemu spalin, dále k přílišnému ochlazování plamene a z toho plynoucímu zpomalení (až zastavení) probíhajících reakcí. [2]

Pro danou situaci je třeba volit tzv. *součinitel přebytku vzduchu* α , vyjadřující poměr množství vzduchu $V_{vz\ sk}$ potřebného pro co nejdokonalejší průběh spalování a množství vzduchu $V_{vz\ min}$ plynoucího z chemických vzorců. [2]

$$\alpha = \frac{V_{vz\ sk}}{V_{vz\ min}} \quad (1.18)$$

Hodnota součinitele α závisí nejen na daném zařízení, palivu apod., ale rovněž na konkrétním místě uvnitř ohniště. Jedním z důvodů je přisávání tzv. *falešného vzduchu* netěsnostmi ve stěnách kotle, což způsobuje nárůst celkového objemu spalin. [2]

Volba velikosti součinitele α pro roštová ohniště se liší v závislosti od výkonu, viz Tab. 6

výkon [%]	15	30	50	80	100
α [-]	1,65	1,53	1,43	1,35	1,30

Tab. 6 - Hodnoty α pro roštová ohniště [8]

U zplyňování se namísto součinitele přebytku vzduchu užívá tzv. zplyňovací poměr, definovaný podle [18] následovně:

$$\lambda = \frac{V_{vz}}{V_{vzt}} \quad (1.19)$$

kde V_{vz} – skutečné množství vzduchu pro zplyňování; V_{vzt} – stechiometrické množství vzduchu.

2. Roštová spalovací zařízení

Spalování na roštích je základní a nejjednodušší způsob spalování kusových tuhých paliv, mezi něž patří následující:

- Fosilní paliva (např. uhlí, uhelné brikety)
- Biomasa (dřeviny, stébelniny aj.)
- Komunální a biologické odpady [2]

Palivo je přikládáno na rošt, kde dochází k jeho spalování v proudu spalovacího vzduchu. Ten je v ohništi distribuován dle konkrétního konstrukčního návrhu.

2.1. Průběh spalování na roštích

Palivo se do ohniště kotle doplňuje ze zásobníku přímo na rošt. Po roštu se palivo posouvá směrem od zásobníku až do škvárové výsypky. Způsoby řešení přemísťování paliva a škváry budou popsány v další podkapitole.

Obecně se spalování tuhých paliv se skládá z více fází, které zahrnují jak prvotní ohřev, tak i vysušení a samotné hoření. Celý proces lze rozvrhnout do následujících kroků:

- Ohřev přikládaného paliva
- Odpaření vlhkosti
- Uvolnění prchavé hořlaviny
- Hoření prchavé hořlaviny
- Hoření pevné hořlaviny [14]

2.1.1. Průběh spalování na roštu

Od zásobníku prochází palivo hradítkem výšky paliva a na roštu vytváří vrstvu o potřebné tloušťce i prodyšnosti. Při postupu dovnitř ohniště nejprve dochází ohřevu paliva a k jeho vysušení. V této fázi dosahuje teplota cca 120 °C, přičemž je cílem odstranit maximální množství vody. [2]

palivo	Fosilní paliva			Biomasa			
	Hnědé uhlí	Černé uhlí	Antracit	Jehličnaté/listnaté dřevo	Kůra	Obilná sláma	Šťovík
vlhkost [%]	23,4	5,2	7,7	30	35	13,10	8,83

Tab. 7 - Výběr obsahů vody v palivech [2]

Uvnitř kusů (částic) paliva, tj. v pórech a kapilárách, dochází k akumulaci vznikající páry a tudíž k nárůstu tlaku. Vlivem tohoto nárůstu dochází k posouvání bodu varu až k teplotám kolem 150 °C. Toto je mimo jiné příčinou efektu praskání paliva během spalování, k čemuž dojde v okamžiku, kdy tlak vyvolaný nahromaděnou párou dosáhne v konkrétním kusu paliva kritické hodnoty. Zmíněný jev je možno omezit jemnější granulací (v případě dřeva místo polen použít štěpku nebo piliny, případně brikety a pelety, kde máme výrazně pórovitější strukturu) a umožnit tak snazší unikání páry. [16]

Jevy spojené s vypařováním vázané vody mají za následek prodlevu v ohřevu, kdy se teplota až do úplného vysušení paliva zastaví na bodu varu v rozmezí 100–150 °C. [16] Nad 150 °C se pak začíná uvolňovat prchavá hořlavina – jde o tzv. zplyňování. Jeho intenzita roste při ohřátí

na teplotu větší než 250 °C. [2] Konkrétní teploty zplyňování se liší v závislosti od složení a druhu paliva. Primární vzduch, proudící skrz rošt, se mísí s prchavou hořlavinou a vytváří směs, u které při teplotě okolo 500 °C dochází ke vznícení. Teplota plamene dosahuje od 500 do 1000 °C. Proud spalovacího vzduchu skrz vrstvu paliva a rošt je udržován vztlakem, vyvolaným ohřevem v plameni, kde dochází až k pětinasobnému snížení hustoty hořících plynů. [16] Pro pokud možno úplné spálení hořlaviny je nad rošt do ohniště přiváděn tzv. sekundární vzduch. Po vznícení prchavých složek dojde rovněž i k zapálení tuhé hořlaviny (zejména uhlíku), jejíž hoření pokračuje i po vyprchání plynů. Maximální teplota hoření uhlí se pohybuje v rozmezí 1350–1450 °C; pro kotle na biomasu pak 1000–1300 °C. K dohořívání dochází v zadní části roštu, kde následuje chladnutí tuhých zbytků po spalování. [2]

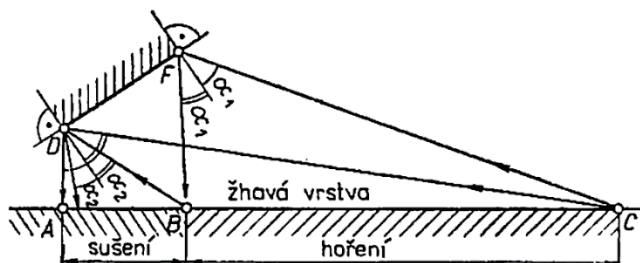
2.1.2. Vysoušení

Jak bylo zmíněno výše, před odplyňováním je třeba palivo zbavit vlhkosti. Jedná se o část procesu spalování, ve které dochází pouze ke spotřebě tepla. Vysoušet lze přímo uvnitř kotle, jednak proudem spalovacího vzduchu s možností jeho předehřívání, dále pak teplem uvolňovaným samotným hořením na roštu. Možné je i předsoušení paliva mimo ohniště (volné sušení, využití tepla spalin, rotační sušárny, ...). [2]

2.1.3. Zápal paliva

Rozlišujeme tyto způsoby přivedení tepla k přikládanému palivu:

- *Horní zápal* – vrstva paliva je zapalována kontaktem s horkými plyny v ohništi, sáláním plamene i stěn a rovněž i záření odraženého od přední klenby ohniště. Ta je tvarově navržena za účelem maximálního odrazu tepelného záření vydávaného hořícím palivem směrem k vysoušecí a odplyňovací části roštu



Obr. 2 – Odrazová funkce přední klenby pro horní zápal [6]

- *Spodní zápal* – zdrojem tepla potřebného ke vznícení je již hořící vrstva, na kterou je nové palivo přikládáno. Zápalu lze dosahovat rovněž přívodem silně ohřátého vzduchu pod rošt.
- *Kombinovaný zápal* [6]

2.2. Druhy roštů

Z hlediska způsobu manipulace s palivem (ruční, mechanické, ...) a typu konstrukce můžeme rošty rozdělit na 2 typy:

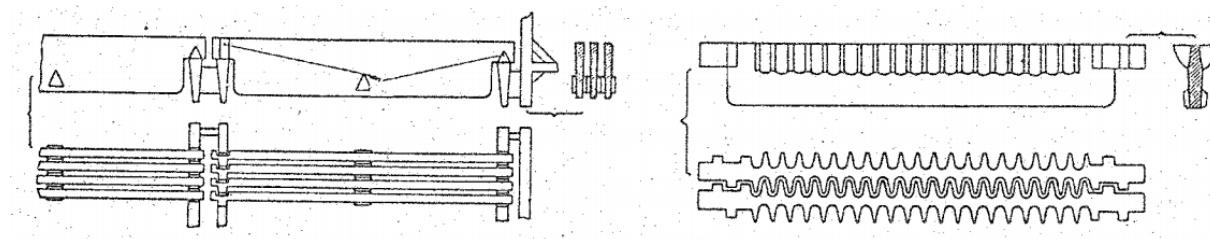
- Kotle s pevným roštem
- Kotle s pohyblivým roštem [19]

2.2.1. Kotle s pevným roštem

a) Kotle s pevným rovinným roštem

Jde o nejjednodušší a nejstarší typ roštu. Lze jej vyrábět v jenom kuse ve formě pevné desky s otvory kruhového nebo jiného tvaru, kterými proudí spalovací vzduch.

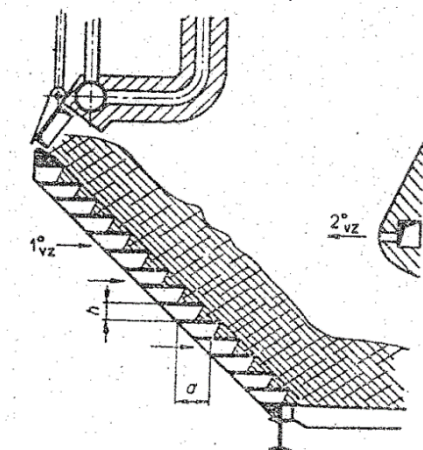
Další možností je rošt sestavený z jednotlivých štíhlých desek, mezi kterými opět proudí vzduch. Pro omezení tepelného namáhání roštu a opalu je třeba zajistit co nejlepší chlazení roštnic. Z tohoto hlediska je výhodnější použít namísto rovinných desek roštnice zvlněné, mající větší povrch, umožňující lepší odvod tepla. Lze se tak vyhnout nutnosti rozšíření mezer mezi roštnicemi, což by mohlo mít za následek propadávání paliva do prostoru pod roštem. [16]



Obr. 3 - Pevné rovinné rošty [19]

b) Kotle s pevným stupňovým roštem

Tato modifikace pevného roštu se skládá ze dvou částí. První, šikmá část se skládá z pevných přímých roštnic s výškou a vzájemným přesahem voleným tak, aby byl zajištěn dostatečný přístup spalovacího vzduchu a zároveň nedocházelo k propadu paliva. Spodní výstupní část tvoří rovinný rošt. Přiložená vrstva paliva postupně odhořívá na šikmé části, sesouvá se dolů do výstupní rovinné části, skrze kterou nespalitelné zbytky propadávají mimo ohniště. Na uvolněné místo na šikmé části je posléze přikládáno další palivo. [19]



Obr. 4 - Pevný stupňovitý rošt [19]

Obě uvedené modifikace pevných roštů se vyznačují časově nerovnoměrným průběhem hoření, způsobeným jednorázovým přikládáním jednotlivých dávek paliva. Z toho vyplývá i periodicky se měnící množství potřebného spalovacího vzduchu. [16] Regulace přiváděného vzduchu je jedním z hlavních problémů těchto spalovacích zařízení.

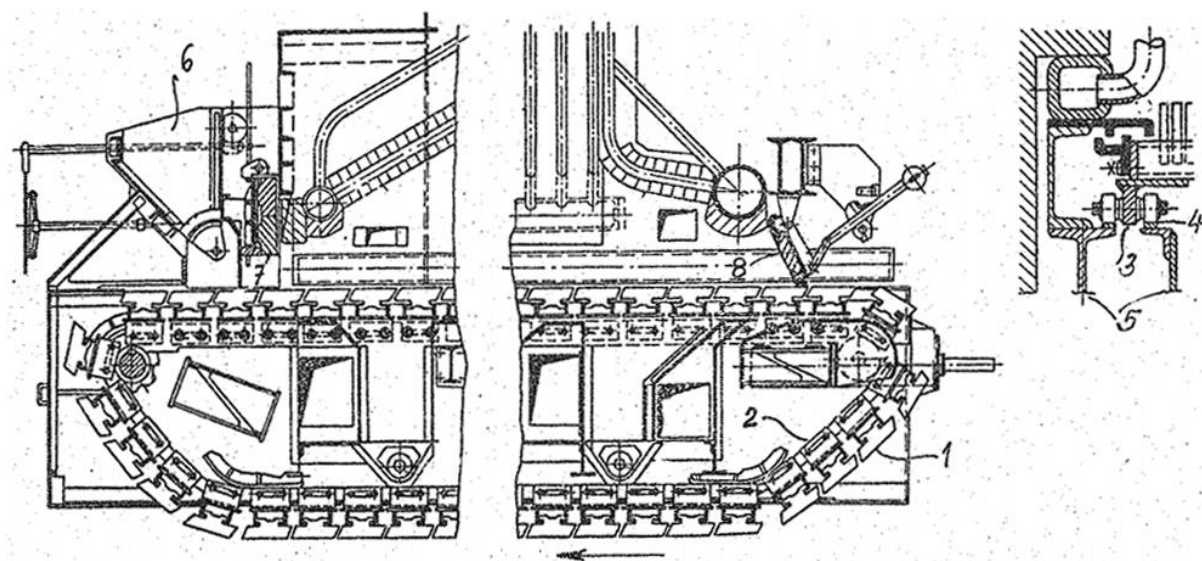
2.2.2. Kotle s mechanickým roštem

Tyto rošty již umožňují v zásadě plynulý pohyb vrstvy paliva. Pohyblivé mohou být buďto jednotlivé roštnice, popřípadě má podobu nekonečného pásu, jehož pohybem je palivo přemísťováno od zásobníku (příkládacího otvoru) až k zadní části ohniště. [2] [19]

a) Pásový rošt

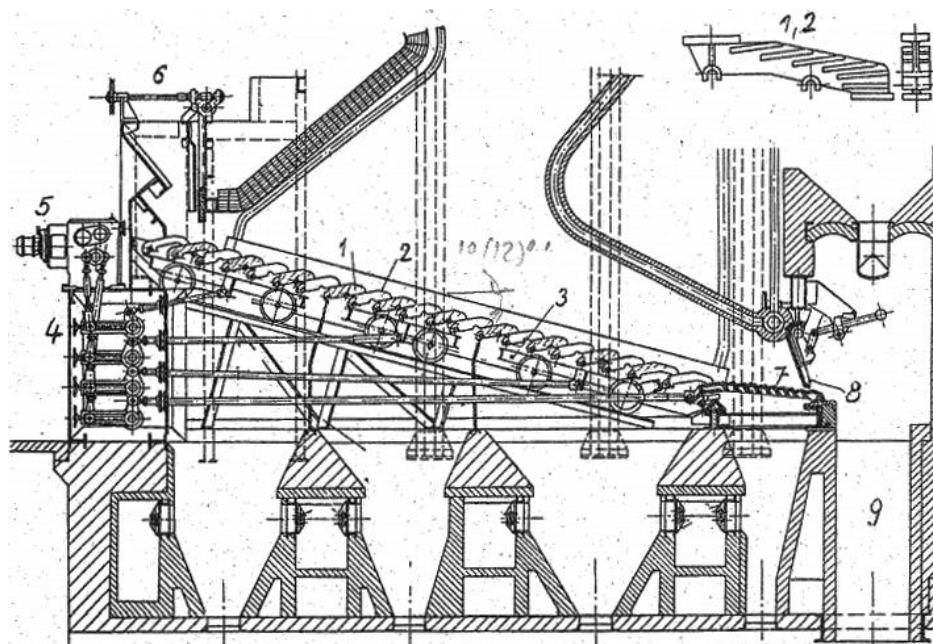
Konstrukce vychází z původního řetězového roštu, kde nosnou plochu pro palivo tvořil široký Gallův řetěz. Tato konstrukce se však ukázala jako nevýhodná z hlediska údržby. Byla-li, byť i jediná, roštnice poškozena, musel být rozebrán celý řetěz a následně provedena výměna vadného článku. Proto došlo k modifikaci, kdy namísto jednoho širokého řetězu byly použity dva pouze po stranách ohniště. [19]

K článkům řetězu (3) jsou přivařeny příčné trámce (2), do kterých jsou roštnice (1) pouze zasunuty a umožňují výměnu bez nutnosti rozebírat celý mechanismus. Gallův řetěz se tak stává pouze nosným a tažným prvkem roštu a nijak nepřichází do styku se samotným palivem. Prohýbání řetězu je zabráněno pomocí kladek (4) umístěných na každém jednotlivém čepu řetězu. Tyto kladky se odvalují po nosném rámu (5). Vrstva paliva je pod výsypkou (6) regulována hradítkem (7) na potřebnou výšku. V zadní části roštu je umístěn výkyvný škrabák, který jednak zadržuje dohořívající tuhý zbytek-škváru na roštu a dále pomáhá utěsnit ohniště proti přísávání falešného vzduchu dovnitř kotle. [19]



Obr. 5 - Schéma konstrukce pásového roštu [19]

b) Přesuvný rošt

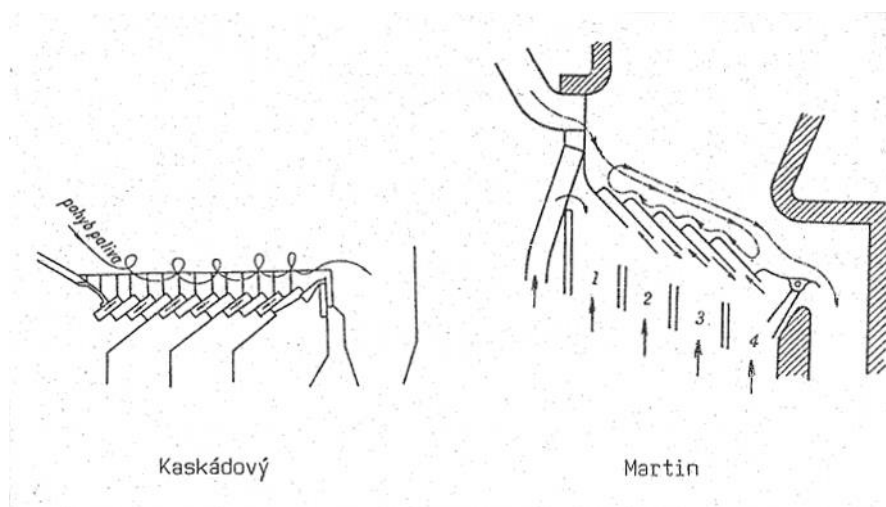


Obr. 6 - Schéma přesuvného roštu [16]

Základní konstrukci tvoří stupňovitý rošt, složený z malých, podélně umístěných úzkých roštnic, srovnaných do příčných vodorovných řad. Zatímco sudé řady (1) jsou nepohyblivě upevněny k nosnému rámu, liché řady (2) jsou připevněny k vozíkům (3). Tyto jsou uloženy na kolejnicích a jsou taženy střídavě tam a zpět pomocí klikových mechanismů (4), poháněných buďto hydraulicky nebo elektromotorem (5). Střídavý pohyb lichých řad roštnic jednak promíchává hořící vrstvu a dále vyvolává pohyb paliva směrem k dohořivacímu roštu (7). Nad ním je umístěn škrabák (8), zadržující dohořívající palivo. Zbytky po spálení pokračují do škvárové výsypky (9). [19]

c) Vratisuvný rošt

Konstrukce je podobná jako u roštu přesuvného. Rozdíl spočívá v odlišném směru pohybu roštnic. U tohoto typu se roštnice pohybují buďto napříč nebo proti směru pohybu vrstvy paliva. Dochází tak k výraznějšímu promíchávání a obracení hořící vrstvy. [19]

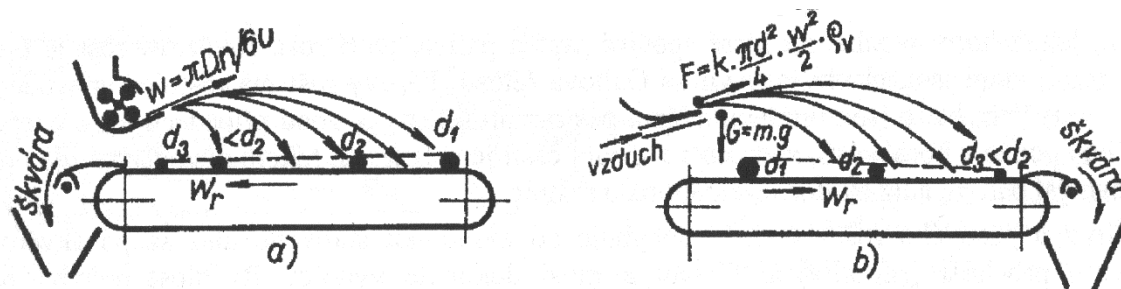


Obr. 7 - Ukázky konstrukce vratisuvného roštu [15]

2.3. Pohazovací zařízení

Pro dopravování paliva na rošt lze použít násypku, kdy palivo samovolně padá na začátek roštu. V případě paliv s vyšším obsahem prchavé hořlaviny je výhodné použít tzv. pohazovačů, které umožňují rozdělení na jemnou a hrubou frakci. [2] Cílem je, aby hrubší kusy paliva měly k dispozici delší čas pro hoření než částice jemnější. Oddělování frakcí funguje na základě setrvačných sil a odporu vzduchu působících na částice. Zařízení dělíme na 2 druhy:

- *Mechanické pohazovače*
- *Pneumatické pohazovače* [2]



Obr. 8 - Pohazovací zařízení a) mechanické, b) pneumatické [2]

V případě mechanických pohazovačů jsou hrubší částice „odhazovány“ dále než jemnější. Horní část roštu se proto pohybuje směrem k pohazovacímu zařízení, pod kterým se nachází škvárová výsypka. U pneumatického pohazovače jsou naopak jemné částice proudem vzduchu „odfukovány“ dále než hrubé. Horní část roštu se pak pohybuje směrem od pohazovacího zařízení. Jelikož u pneumatického pohazovače je čas do dopadu na rošt u jemné frakce delší, mohou tyto částice shořet už za letu. [6]

2.4. Spalovací vzduch

Po palivu je druhou pracovní látkou vstupující do spalovacího zařízení vzduch, přiváděný do jednoho nebo více míst ohniště. Pro spalovací vzduch lze vyjmenovat zejména tyto funkce:

- Okysličuje látky v palivu s následným uvolněním tepla
- Pomáhá ohřívat palivo na zápalnou teplotu
- Vysouší palivo
- V případě jeho předehříváním pomocí spalin zajišťuje návrat části tepla odnášeného spalinami zpět do zařízení

Volba umístění přiváděného spalovacího vzduchu a jeho vlastnosti se volí na základě požadovaného výkonu, typu zařízení (roštové, fluidní, práškové, ...), druhu paliva, ekologických požadavků apod. Hlavními parametry, jež je možno regulovat, jsou objemový průtok, teplota vzduchu a množství obsažených vodních par.

Cirkulace plynů uvnitř ohniště je zajištěna buďto vztakovým působením, kdy atmosférický vzduch u vstupu do ohniště má vyšší hustotu nežli spaliny, které tak svou vlastní tíhou tlačí komínem vzhůru; jindy je zapotřebí ventilátorů na straně spalovacího vzduchu nebo spalin, příp. obou. Podle rozložení tlaku uvnitř zařízení rozlišujeme:

- Kotle s přetlakem* – ventilátory jsou umístěny na straně vzduchu, který je čerpán směrem do zařízení. Zde je vytvářen přetlak podporující odvod spalin. V případě nedostatečného utěsnění však u tohoto způsobu hrozí únik spalin do pracovního prostředí v okolí kotle.

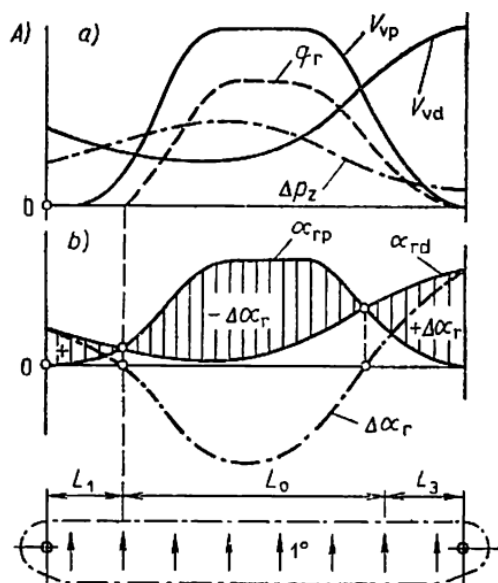
- b) *Kotle s podtlakem* – ventilátory jsou umístěny na straně spalín, přičemž v místě ventilátorů vzniká mírný podtlak obvykle 40-80 Pa, maximálně 100 Pa. Tento způsob zajišťuje pouze minimální únik plynů z kotle na straně spalín za provozu a také např. během kontroly otevřenými průřazy v ohništi. Nevýhodou podtlakových zařízení je přisávání falešného vzduchu netěsnostmi a z toho plynoucí nárůst potřebného výkonu sacích ventilátorů. [19]

Do kotlů podtlakových řadíme rovněž i kotle s *přirozeným tahem*, tj. kotle, kde zdrojem tahu je právě pouze tlakový rozdíl mezi spalínami unikajícími z komína a okolím kotle. Tento způsob se využívá zpravidla u menších zařízení, pro větší výkony se využívá *umělý tah* vyvozovaný ventilátory. Komín tak ztrácí význam zdroje tahu a slouží pouze k odvodu spalín z pracovního prostředí. [19]

2.4.1. Rychlost a množství spalovacího vzduchu

Rychlost proudění spalovacího vzduchu (primárního či sekundárního) má následující vlivy na kvalitu spalování: [6]

- *Nižší* rychlosti jsou vhodné pro kotle, kde počítáme s přirozeným tahem, zajišťují menší množství jemného popílku unášeného spalínami
- *Vyšší* rychlosti vedou k výraznějším turbulencím v prostorách kotle a tudíž lepšímu promíchání prchavé hořlaviny se vzduchem. Rovněž zajišťují rychlejší vysoušení paliva. Pro omezení odnosu popílku spalínami je vhodné používat paliva tříděná (s co nejnižším obsahem jemných částic).



Celkové množství potřebného spalovacího vzduchu se řídí zejména stechiometrickými rovnicemi pro spalování jednotlivých složek hořlaviny. Tím je určeno minimální potřebné množství vzduchu [2]. Dle výše zmíněného součinitele α (kap. 1.6.4) je objemový průtok vzduchu oproti minimálnímu teoretickému množství navýšen. Pro co nejdokonalejší spalování je vhodné volit hodnotu součinitele lokálně pro jednotlivá pásma roštu (α_r).

V částech, kde dochází pouze k sušení nebo dohořívání tuhého zbytku, je menší spotřeba vzduchu než v místě, kde se spaluje i prchavá hořlavina. Ilustrace rozdělení spotřeby vzduchu po délce roštu je uvedena na Obr. 9.

Obr. 9 - Vzduchové poměry roštu bez pásmování [6]

Je rovněž důležité utěsnění jak prostoru kolem roštu, tak i těsnící funkce palivového hradítka a škvárového jízku, jež mají být navrženy tak, aby jimi procházející vrstva paliva vytvářela uzávěr proti průchodu falešného vzduchu. Významnou roli hraje homogenita vrstvy paliva. Je třeba zajistit, aby byla vrstva paliva po šířce roštu stejnoměrně propustná a nevznikaly místa s přebytkem a nedostatkem spalovacího vzduchu, což by jinak vyžadovalo navýšení průtoku vzduchu, aby se vyrovnal deficit ve všech místech roštu, avšak také by docházelo k přílišnému ochlazování vrstvy paliva a snížení účinnosti kotle. [6] Lepších vlastností vrstvy lze dosáhnout tříděním paliva nebo úpravou podélného profilu palivového hradítka. [6] Výraznější proudění

vzduchu je v místech s vyšší teplotou vhodné z důvodu chlazení roštnic a omezení opalu. [19] Rozložení průtoku v jednotlivých částech roštu lze ovlivnit vhodným rozmístěním přívodů vzduchu, tvarovým řešením kotle, ovládacími klapkami aj.

2.4.2. Dělení přiváděného vzduchu

Pro paliva s nízkým obsahem tuhé hořlaviny je postačující přívod paliva pod rošt. U méně kvalitních druhů uhlí, biomasy aj. s vyšším obsahem prchavých složek je žádoucí přivádění vzduchu i do prostoru nad roštem, kde se mísí s unikající nespálenou hořlavinou a umožňuje její spalování. [19] V prvním případě mluvíme o *ohništi s jedním ohniskem hoření*, v druhém případě o *ohništi se dvěma ohnisky hoření*. Při dvou ohniscích rozlišujeme vzduch:

- *Primární (1°)*
- *Sekundární (2°)* [2]

Některá konstrukční řešení zavádí více přívodů vzduchu nad roštem – tzv. *terciální vzduch*. Poměr 1° i 2° vzduchu je určen zejména právě podílem prchavé hořlaviny, viz. Tab. 3.

2.4.3. Teplota a předehřívání

Teplota přiváděného vzduchu závisí na celkovém uspořádání kotle, použitých materiálech, palivu a možnosti ohřevu. S rostoucí teplotou spalovacího vzduchu je palivo rychleji a lépe vysušováno, nastává intenzivní zplyňování a rychlejší zápal paliva. Na druhou stranu však dochází k většímu tepelnému namáhání roštnic, s rostoucí teplotou rovněž roste i měrný objem vzduchu, tudíž je třeba většího výkonu vzduchových ventilátorů. U malých domácích kotlů se používá atmosférický vzduch bez předehřevu (pokojová teplota 20°C), u přesuvných roštů a výhřevnějších paliv se běžně vzduch předehřívá na 150-200°C, u pásových roštů, paliv s vyšší teplotou měknutí popele a vlhkých paliv pak na 200-250°C. [6]

Pro zvýšení teploty spalovacího vzduchu se využívá *ohříváků*, které umožňují předání tepla buďto z vnějšího zdroje nebo tepla spalín. V druhém případě je třeba dodržet, aby vzduch na vstupu do ohříváku měl teplotu dostatečně vysokou oproti rosnému bodu spalín z důvodu prevence koroze. Toho se dosahuje buďto vhodným návrhem součinitele přestupu tepla stěnou oddělující vzduch a spaliny nebo zvýšením teploty vzduchu přiváděného do ohříváku. To je možné pomocí recirkulace části ohřátého vzduchu zpět před ohřívák nebo sáním vzduchového ventilátoru. Druhým způsobem je předehřev např. vodní parou. Třetím způsobem je předehřev ve výměníku pomocnou teplotonosnou látkou v tzv. *Perkinsonových trubkách*. Opět se využívá tepla spalín. [8]

Rozlišujeme ohříváky *rekuperační*, kde teplo je předáváno stěnou trubky či nádoby; druhou třídu nazýváme *regenerační*, používající k přenosu tepla prostředníka (konstrukční prvek nebo médium), jež v sobě střídavě akumuluje teplo spalín a které následně předává vzduchu. [6]

3. Modelování anizotermního proudění dvou plynů

3.1. Stacionární turbulentní proudění

Při tomto typu proudění tekutiny dochází k chaotickým fluktuacím v prostoru i čase. Při jejich vzniku se v proudícím médiu uplatňují jevy na mikroskopické úrovni. V důsledku neuspořádaného pohybu částic (Brownův pohyb) jednotlivé molekuly náhodně přecházejí mezi oblastmi s různými rychlostmi proudění, přičemž dochází k vzájemnému předávání hybnosti – toto se navenek projevuje jako vnitřní tření v tekutině. [20] Typickou prostorovou

strukturou pro oblast vykazující turbulentní charakter proudění jsou víry neboli „eddies“. Snahou je využití právě těchto struktur při popisu a předpovědích chování tekutin při turbulenci, tj. vývoj těchto struktur v čase, jejich vznik a zánik, jakožto i změna velikosti, kdy z větších vírů postupně vznikají menší. Rozpadem větších vírů na menší dochází k disipaci původní kinetické energie proudu a její přeměně na energii tepelnou. [20] V současnosti jsou nám dostupné pouze přibližné metody výpočtů. Navzdory pokrokům v matematice od doby, kdy vznikly rovnice pro pohyb tekutin, se stále nepodařilo sestavit obecné analytické řešení turbulentního proudění. Při numerických simulacích se využívají následující přístupy: [20]

- *přímá simulace (DNS)* – univerzální, avšak vykazující značné výpočetní nároky. Velikost buněk výpočetní oblasti je třeba přizpůsobit velikostem nejmenších vírů. Jejich velikost přitom prudce klesá s Reynoldsovým číslem.
- *metoda velkých vírů (LES)* – menší víry jsou odstraněny pomocí filtrace turbulentního pole. Ponechány jsou velké víry, jež mají největší význam v transportních jevech v tekutině. Je tak zajištěna dostatečně omezená míra „zjemnění“ výpočetní sítě.
- *metoda časového středování (RANS)* – základ statistických modelů turbulencí, jež jsou nejpoužívanější v inženýrských úlohách.

3.1.1. Statistické modely

Zejména pro jednodušší modely turbulence je lokální stav turbulence popsán tzv. turbulentní viskozitou. Nejedná se v tomto případě o materiálovou charakteristiku jako např. u dynamické viskozity, nýbrž o funkci veličin souvisejících se stavem proudící tekutiny a na poloze uvažovaného bodu. V rámci Boussinesquovy hypotézy o turbulentní viskozitě je definována vztahem (3.1), kde l je délkové a u rychlostní měřítko. [20]

$$\mu_t \approx l \cdot u \quad (3.1)$$

Cílem uvedených metod je vyjádření velikostí turbulentních napětí a skalárních veličin jako např. teplota nebo molární koncentrace v proudovém poli. Modely jsou rozděleny do 3 skupin podle počtu doplňujících diferenciálních rovnic – nularovnicové (algebraické), jednorovnicové a dále pak popsané dvourovnicové. [20]

- *Model směřovací délky (nularovnicový)* – první a nejjednodušší model navržený Prandtem. Předpokladem je lokální rovnováha, tj. produkce turbulentní kinetické energie je rovna rychlosti disipace této energie. Vhodné použití je pro případ proudění ve smykové vrstvě [20]
- *Spalart-Allmaras model (jednorovnicový)* - užívá transportní rovnici pro rychlostní měřítko turbulentního pohybu \sqrt{k} , kde k [J/kg] je kinetická měrná energie turbulentního pohybu. Na rozdíl od předchozího modelu řeší transport turbulentních parametrů. [20]
- *Eddy viscosity transport model (jednorovnicový)* – velice jednoduchý model odvozený ze základního k - ε modelu. Namísto rovnice pro rychlostní měřítko řeší diferenciální rovnici pro turbulentní viskozitu ν_t . [21]

Složitější a přesnější dvourovnicové modely jsou navzdory výpočtové náročnosti využívanější vzhledem k dostupnosti dostatečně výkonné výpočetní techniky. Kromě turbulentní kinetické energie k řeší i délkové měřítko l_t . To bylo u předchozích typů popsáno algebraickými rovnicemi. Veličinou, jež má vliv na vývoj rozměrů vírů v čase, je rychlost disipace ε , řešená druhou diferenciální rovnicí vedle rovnice pro k . Mluvíme tu o tzv. k - ε modelech. Stejně jako pro k je i rovnice pro ε odvozena z Navier-Stokesových rovnic.

Turbulentní viskozita je pak definována jako funkce těchto dvou veličin vztahem (3.2). Oblast použití modelu je v případech s vysokým Reynoldsovým číslem (≥ 200000). [21]

$$\nu_t = c_v \cdot \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.2)$$

kde c_v je empirická konstanta.

Mimo základní model existuje i jeho modifikace *RNG (ReNormalization Group) k- ε model*, jež se liší výpočtem turbulentní viskozity, počítané pomocí iteračních procesů a definované odlišným vztahem. Rovněž se využívá odlišných empirických konstant. Model je vhodný pro rozsáhlé oblasti se zavíráním i výskytem laminárního proudění. [21]

U další skupiny modelů je rovnice pro rychlost disipace nahrazena rovnicí pro výpočet vířivosti ω [s^{-1}], popisující míru rotace tekutiny v daném místě proudového pole. Jsou to tzv. *k- ω modely*, vhodné pro situace s nižším Reynoldsovým číslem (≤ 200000) a přechodové režimy proudění. Jelikož model sice dobře popisuje proudění u stěny, avšak jeho přesnost ve volném proudu klesá, byly i zde vyvinuty modifikace. Kombinací *k- ε* a *k- ω* vznikl tzv. *BSL (Baseline) model*, kde rovnice pro ε je upravena pomocí vířivosti ω . Nejde však stále o zcela univerzální metodu výpočtu turbulentního proudění. Pro situace s velkými smykovými napětími v tekutině, např. u lopatkových strojů se jeví velmi vhodné využít modifikaci *k- ω* , tzv. *SST (Shear stress transport) k- ω model*, s modifikovanou rovnicí pro vířivost.

3.2. Transport příměsí

Mimo kinematických veličin a transportu turbulentních veličin se počítá i transport veličin souvisejících s obsahem chemických látek, v první řadě hmotnostních zlomků m_i [kg/kg], definovaných vztahem (5.3). [20]

$$Y_i = \frac{m_i}{m} = \frac{\rho_i V_i}{\rho V} = \frac{\rho_i}{\rho} \alpha_i \quad (3.3)$$

Vedle hmotnostních zlomků se používá molární koncentrace c_i [$kmol/m^3$], případně součin molární hmotnosti M_i a molární koncentrace c_i . Transport příměsí lze řešit jak pro laminární, tak pro turbulentní proudění, přičemž pro oba typy je odlišně definován difúzní tok J_i příměsí. [20]

3.3. Přenos tepla

Pro začátek je vhodné uvést tři základní způsoby přenosu tepla v látkových prostředích:

- vedením (kondukcí)
- prouděním (konvekcí)
- zářením (radiací)

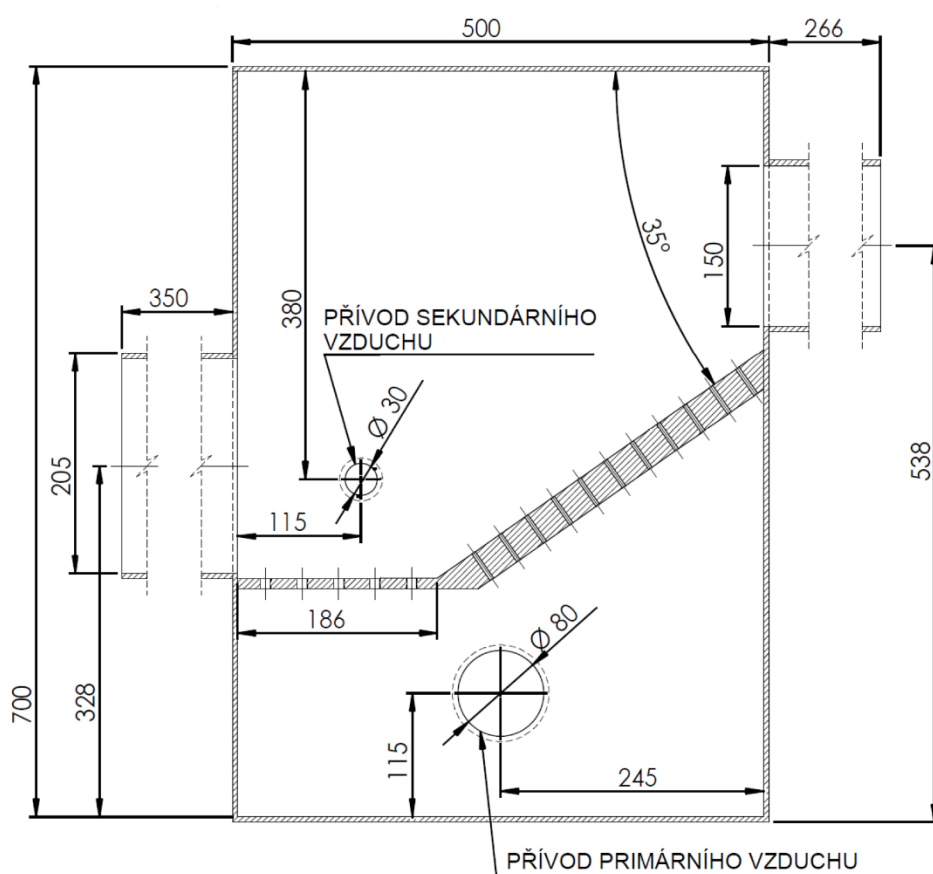
Vedení se v našem případě uplatňuje zejména ve stěnách zplyňovací komory. Sáláním se teplo šíří jak uvnitř komory, tak i z povrchu stěn komory do okolního prostoru. Přenos tepla prouděním probíhá uvnitř komory i z vnější strany stěn (nejméně u dna, více pak v okolí bočních stěn a nejvíce u víka komory). Při zkoumání šíření tepla uvnitř daného prostoru je počítáno rozložení teploty T [K], na stěnách komory tepelný tok Q [$J \cdot s^{-1}$] a hustota tepelného toku q [$J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$].

Pro modelování přenosu tepla v tekutinách se využívá rovnic kontinuity pro hmotu, hybnost a energii. Všechny veličiny jsou počítány jako turbulentní.

Ve své práci jsem uvažoval pouze samotnou zplyňovací komoru, resp. její nadroštovou část, ve které nastávají modelované jevy, tj. mísení plynů. Parametry komory jsou následující:

- Jmenovitý výkon: 110 kW
- Hmotnost: 600 kg
- Palivo: dřevní štěrka, pelety nebo piliny (maximální velikost částic 30 mm)

Samotný rošt je pevný stupňovitý, tvořený šikmou částí, po kterém se přiložené palivo vlastní vahou sesouvá. Nejprve dochází k jeho vysoušení a posléze ke zplyňování. Zbytky paliva posléze přechází na vodorovnou dohořivací část. Tuhé zbytky po spálení propadávají do spodní části komory pod rošt, odkud jsou manuálně vybírány. Na roštu uvolňované plyny se mísí s přiváděným sekundárním vzduchem a odchází kanálem čtvercového průřezu z komory. [22]



Obr. 10 - Schéma zplyňovací komory [10]

5. Analýza anizotermního proudění dvou plynů

Pro praktickou část své práce jsem použil program COMSOL Multiphysics, nabízející potřebné nástroje pro problém simulace mísení plynů o různých teplotách. V první řadě bylo třeba rozhodnout, jaké fyzikální oblasti se daný problém bude týkat; následoval výběr a vhodná úprava geometrie modelu, kterýžto vycházel z konkrétní konstrukce komory ZKG a modelů použitých v předešlých pracích [10].

Mezi významné děje, odehrávající se uvnitř komory, patří tyto:

- a) Turbulentní proudění plynů v tíhovém poli
- b) Výměna tepla mezi oběma plyny v důsledku jejich rozdílných teplot na vstupu (plyny odcházející z roštu mají značně vyšší teplotu než spalovací vzduch – i navzdory jeho předehřívání)
- c) Tepelné ztráty stěnami kotle
- d) Interakce plynů o různém chemickém složení

Při těchto jevech jsem se rozhodl využít tři typy „fyziky“ a sice *Turbulent flow* pro jevy a); *Heat transfer in fluids* pro jevy b) a c); pro mísení plynů d) pak *Transport of concentrated species*, přičemž jako primární složka vystupuje vzduch. Produkty zplyňování jsou řešeny v podobě příměsí o velkém hmotnostním i objemovém zlomku a jsou rozptylovány ve spalovacím vzduchu. Na „roštovém“ vstupu, tedy v místě zplyňovaného paliva, je okrajová podmínka obsahu příměsí volena jako $w_{22}=1$; na vstupu spalovacího vzduchu je pak hmotnostní zlomek $w_{22}=0$.

5.1. Definování výpočetní oblasti

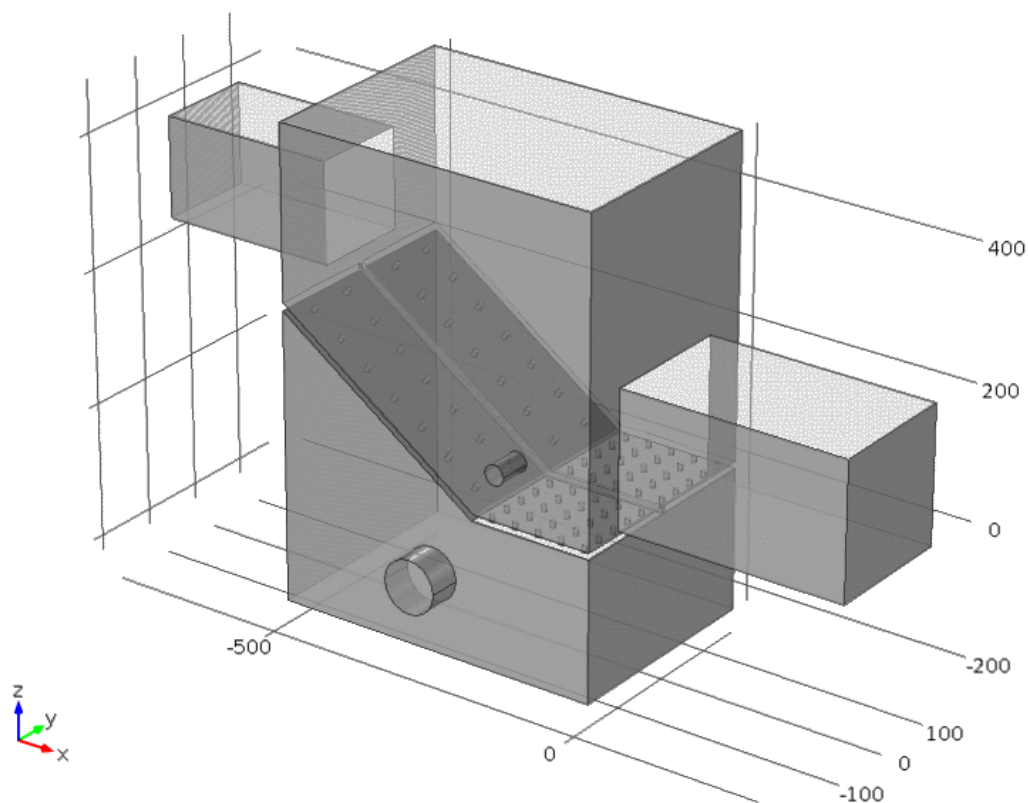
V závislosti od řešeného problému jsem přikročil k úpravám výpočetní oblasti oproti přechodnému modelu, jež počítal s prouděním plynu o konstantním chemickém složení a teplotě.

5.1.1. Volba a úpravy geometrie

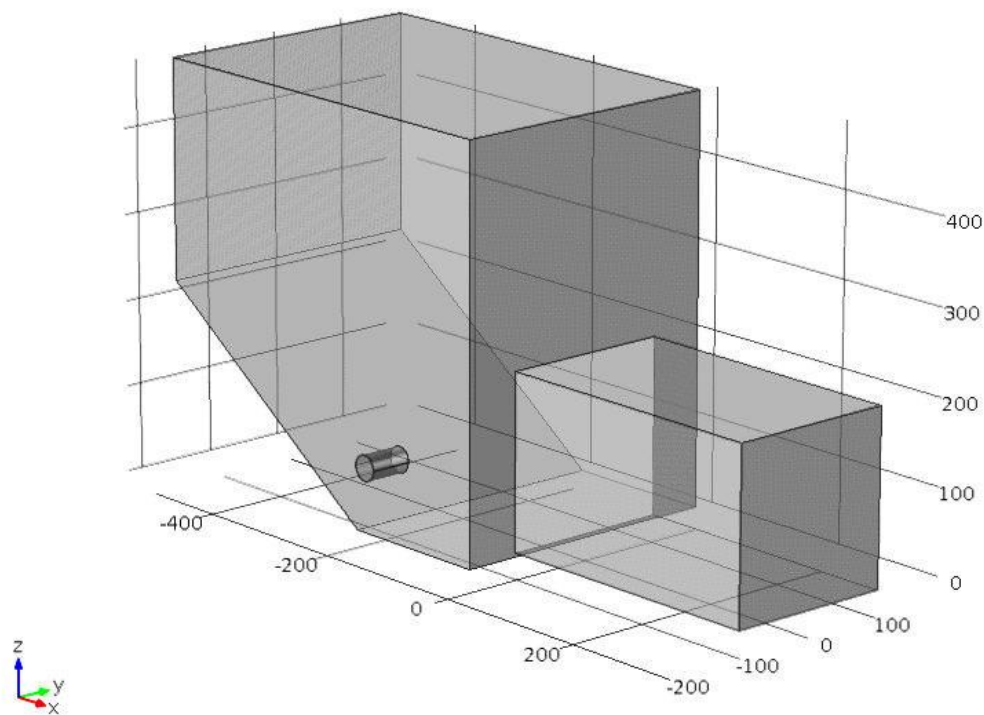
Jak bylo výše uvedeno, samotná geometrie vychází jednak z konstrukce samotného zařízení, dále pak byly uvažovány úpravy provedené v předchozích pracích. Jednalo se zejména o odstranění nosných prvků roštu, tvarových nedokonalostí stěn zplyňovací komory a dalších. Výslednou úpravu geometrie dle [10] ukazuje Obr. 11.

Pro modelování mísení vyvstala otázka, zda je třeba uvažovat prostor pod roštem. Zde přiváděný primární vzduch pouze proudí k jednotlivým otvorům v roštu a s jinými látkami se mísí a reaguje teprve těsně po průchodu roštem. Proudění ve spodní části je tudíž podstatné z hlediska rozložení množství vzduchu procházejícího vrstvou paliva po ploše roštu, nikoli však z hlediska interakce různých látek.

Při průchodu vzduchu vrstvou paliva bylo v rámci zjednodušení modelu uvažováno zrovnoměrnění rychlostního profilu po ploše roštu; podobně u produktů zplyňování, resp. hoření, je bráno jeho složení jako konstantní po celé ploše roštu (zanedbáváme skutečnost, že v různých místech roštu je palivo v odlišných fázích zplyňování a z toho plynoucí odlišné složení). Po těchto úvahách můžeme tedy odstranit z modelu sponi část pod roštem a dostáváme tak zjednodušený model, viz. Obr. 12.



Obr. 11 - Původní model kotle [10]



Obr. 12 - Zbýlá nadroštová část bez přívodu paliva

5.1.2. Rošt

První ze dvou vstupů zahrnuje plyn uvolňovaný z roštu, jež se skládá jednak z atmosférického dusíku, dále pak z produktů autotermního zplyňování přikládávaného paliva. Bylo třeba vyřešit několik parametrů tohoto vstupu:

- *Molární hmotnost směsi plynů* M_{mix} – tato závisí jednak od molárních hmotností jednotlivých složek, dále pak od jejich molárních zlomků. Ty jsou v případě ideálního plynu rovny objemovým. Výpočet je proveden podle vztahu (5.1). [23]

$$M_{mix} = \sum_i M_i x_{vi} \quad (5.1)$$

kde M_i – molární hmotnost složky a x_{vi} – objemový zlomek složky směsi

Pro tento výpočet bylo třeba stanovit složení, resp. objemový podíl složek požadovaný ve výpočtu výše. Zde jsem vycházel z hodnot udávaných v [24] pro autotermní zplyňování smrkového dřeva (měření probíhalo při zplyňování ve fluidním loži). Hodnoty $H_2 - O_2$ jsou dány, hodnota pro dusík byla volena jako doplněk do 100%.

plyn	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	O ₂	N ₂
M_i [g/mol]	2,016	28,010	44,010	16,042	32,000	28,016
x_i [%]	10,0	13,1	15,6	0,8	0,5	60,0

Tab. 8 – Parametry složek dřevoplynu (smrkové dřevo) [24] [23]

Výpočet molární hmotnosti směsi pro toto složení:

$$M_{mix} = \sum_i M_i x_{vi} \doteq \underline{27,834 \text{ g/mol}}$$

- *Hmotnostní průtok* – odpovídá součtu hmotnostního toku primárního vzduchu a množství zplyněného paliva za jednotku času. Pro určení celkového hmotnostního toku jsem použil hodnoty [22].

hmotnostní tok paliva	$m_{pal} [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$	$1,05 \cdot 10^{-2}$
množství vzduchu na 1 kg paliva	$m_{VV} [\text{kg} \cdot \text{kg}_{pal}^{-1}]$	8,69
podíl primárního vzduchu	$k_{1^\circ} [-]$	0,4
obsah popelovin	$A^r [-]$	$7,71 \cdot 10^{-3}$

Tab. 9 - Hodnoty pro výpočet vstupu plynů z roštu

Z rovnice (5.2) spočteme množství primárního vzduchu:

$$m_{1^\circ} = k_{1^\circ} \cdot m_{VV} \cdot m_{pal} \quad (5.2)$$

$$m_{1^\circ} = 0,4 \cdot 8,69 \cdot 1,05 \cdot 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \doteq \underline{3,65 \cdot 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}}$$

Po sečtení s množstvím paliva zmenšeného o obsah popelovin dostáváme celkový hmotnostní tok:

$$m_1 = (1 - A^r) \cdot m_{pal} + m_{1^\circ} \quad (5.3)$$

$$m_1 = [(1 - 7,71 \cdot 10^{-3}) \cdot 10,5 \cdot 10^{-2} + 3,65 \cdot 10^{-2}] \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$m_1 \doteq \underline{14,14 \cdot 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}}$$

- *Teplota* – na roštu předpokládáme konstantní hodnotu v čase a pro zjednodušení i homogenní přes celou plochu roštu. Na doporučení vedoucího práce jsem volil hodnotu $t_1=800^{\circ}\text{C}$ z rozsahu teplot $800\text{-}1000^{\circ}\text{C}$ [11].

5.1.3. Sekundární vzduch

Z okrajových podmínek pro sekundární vzduch bylo třeba určit hmotnostní tok, který je tvořen zbylým vzduchem. Toto množství je rovno:

$$m_{2^{\circ}} = (1 - k_{1^{\circ}}) \cdot m_{VV} \cdot m_{pal} \quad (5.4)$$

$$m_{2^{\circ}} = 0,6 \cdot 8,69 \cdot 1,05 \cdot 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = \underline{5,47 \cdot 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}}$$

Spalovací vzduch je přehříván na teplotu $199,5^{\circ}\text{C}$ [22]. Molární hmotnost suchého vzduchu je rovna $28,964 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ [23].

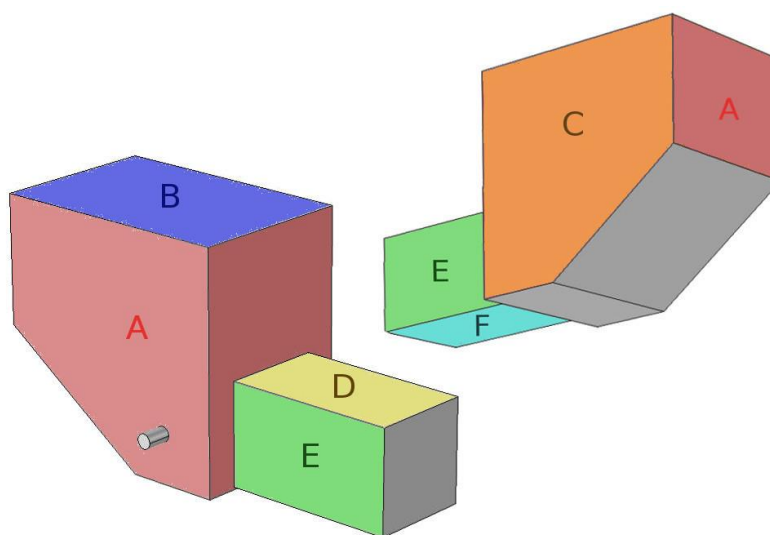
5.1.4. Tepelné ztráty nadroštové části

Při měření a výpočtech dle [22] byl ztrátový výkon vedením a sáláním zplyňovací komory stanoven přibližně na $5,25 \text{ kW}$, což při jmenovitém výkonu komory 110 kW tvoří $4,77 \%$ celkového tepla. Ochlazování plynů v blízkosti stěn kotle má vliv na jejich proudění ve zplyňovací komoře a tento jev je tedy do modelu zahrnut.

Pro zjištění množství tepla odváděného stěnami kotle chlazenými konvekcí okolního vzduchu jsem využil hodnoty součinitelů prostupu tepla uvedených v [22]. Hodnoty jsou sestaveny do Tab. 10.

plochy	A	B	C	D	E	F
$\alpha[\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$	6.47	7.65	5.25	9.02	6.23	4.51

Tab. 10 - Součinitele přestupu tepla skupin ploch A-F



Obr. 13 - Znázornění ploch A-F pro tepelné ztráty

Externí teplota, resp. teplota místnosti byla zvolena z laboratorních podmínek [22] jako 25°C . Pro ztráty sáláním stěn do okolí byla pro všechny plochy volena emisivita $\varepsilon_r=0,96$ (emisivita sálavého povrchu černého nátěru).

5.1.5. Vliv tíhového pole Země

Jelikož se hustoty obou plynů liší v důsledku různých teplot a chemického složení, do hry vstupuje vztlakové působení na plyny v tíhovém poli. Pro model bylo třeba definovat objemovou sílu F_{vol} jako součin hustoty plynu a místního tíhového zrychlení:

$$F_{vol} = \rho \cdot g \quad (5.5)$$

Pro tíhové zrychlení má COMSOL automaticky definovanou hodnotu $9,80665 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, technická hodnota g je pak $9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ [25]. Jednak pro upřesnění, částečně i pro zajímavost jsem použil hodnotu vypočtenou ze vztahu: [25]

$$g = 9,7803 \cdot (1 + 0,0053 \cdot \sin^2 \Phi_i) - 3 \cdot 10^{-6} \cdot z_i \quad (5.6)$$

Pro zvolenou nadmořskou výšku 300 m n. m. a zeměpisnou šířku $49^\circ 13' 29''$, obojí platné pro budovu D5 FSI, vychází hodnota $g=9,80913 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

5.2. Výsledky analýzy proudění v softwaru COMSOL Multiphysics

Pro kontrolu správnosti výsledků posloužila kromě kontroly správného rozsahu hodnot (např. u hmotnostních zlomků) i hodnota rozdílu hmotnostních průtoků na vstupu a výstupu. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce Tab. 11.

-	rošt	2° vzduch	výstup	rozdíl
průtok [g/s]	140,54	54,7	198,09	2,85

Tab. 11 - Výsledky analýzy – hmotnostní průtoky

Hrubší síť modelu usnadnila průběh výpočtu a urychlila konvergenci, jedním z nežádoucích efektů je však „ztráta“ 2,85 g/s plynu uvnitř komory. Rozdíl tvoří cca 1,5% celkového toku. S ohledem na předchozí zjednodušení modelu jsem se rozhodl tuto odchylku zanedbat.

5.2.1. Rychlost

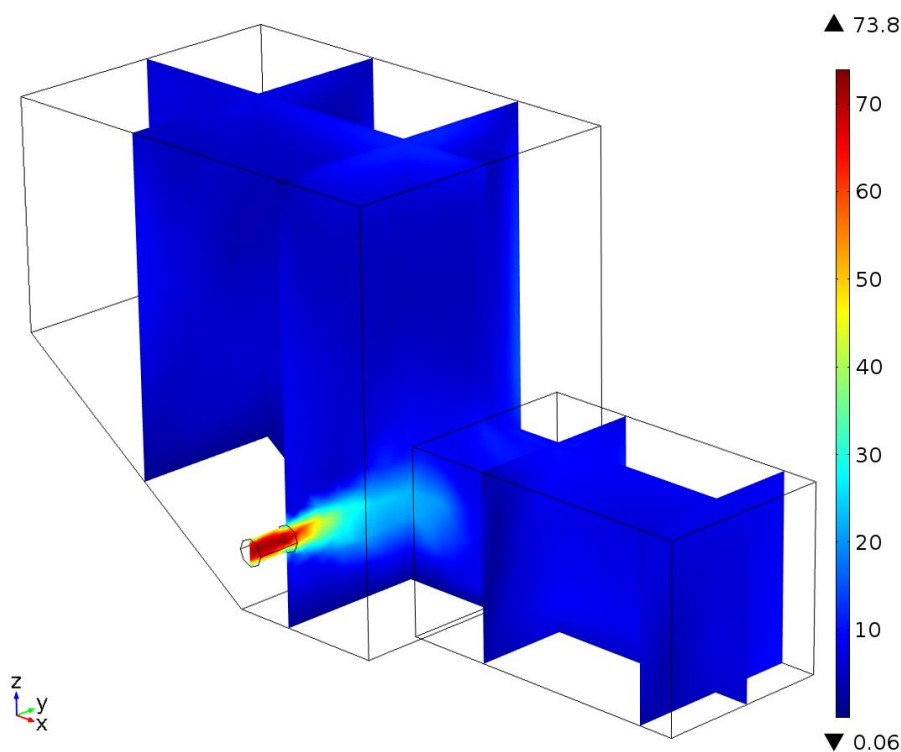
Rychlostní pole uvnitř komory je ovlivňováno zejména geometrií komory, okrajovými podmínkami (rychlost na vstupu, tlak na výstupu), vztlakovým působením a vlastnostmi plynu v daném místě objemu. Proudění je uvažováno jako turbulentní. Tento předpoklad je založen nejen na vysoké hodnotě rychlosti na vstupu 2° vzduchu, ale i na faktu, že turbulence je posilována vztlakovými jevy při vypouštění chladnějšího vzduchu nad teplejší plyn proudící z vrstvy paliva; rozdíl hustot obou plynů je navíc posilován rozdílným chemickým složením (molární hmotnost 2° vzduchu je vyšší než u dřevoplynu). Vzájemná poloha vrstev obou plynů je dalším faktorem, který vedle Reynoldsova čísla určuje charakter proudění.

Uvnitř zplyňovací komory dominuje vír poháněný proudem 2° vzduchu. Proud prochází nad dohořívacím roštem, posléze se tříští o protější stěnu komory a z větší části odtéká podél této stěny vzhůru rychlostí cca 14 m/s, přičemž s sebou strhává i dřevoplyn z roštu pod ním. Směs plynů proudí podél stropu šikmo k příkladacímu otvoru, kde se odráží a odchází středem komory v podobě víru. Proudnice ve středu komory jsou tvořeny pravotočivými šroubovicemi. Obvodová rychlost víru se pohybuje v rozmezí 3-6 m/s, rychlost v jeho středu max. 1 m/s.

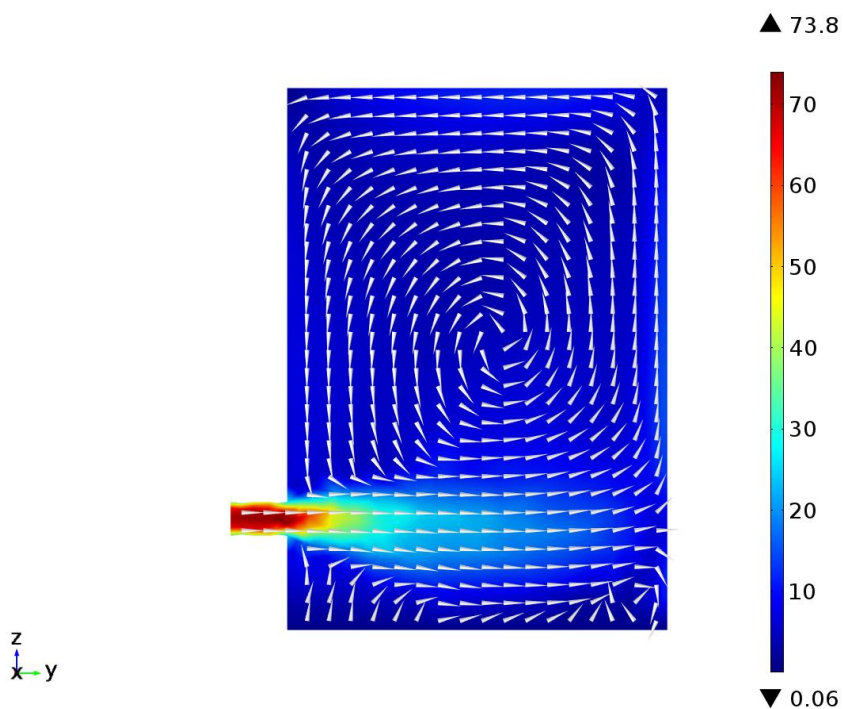
Nejvyšší hodnota rychlosti je dle očekávání v místě přívodu 2° vzduchu, kde numerický výpočet ukázal rychlost 73,833 m/s. Ve skutečnosti by maximum mělo dosahovat přinejmenším střední hodnoty rychlosti \bar{u} v průřezu přívodu 2° vzduchu. Střední hodnota rychlosti je dána vztahem (5.7). Hustota ρ_{T2° vzduchu při 200°C je brána z [23].

$$\bar{u} = \frac{m_{2^\circ}}{\rho_{T2^\circ} \cdot S_{2^\circ}} \doteq \frac{5,47 \cdot 10^{-2}}{0,723 \cdot 7,07 \cdot 10^{-4}} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \doteq 107,01 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.7)$$

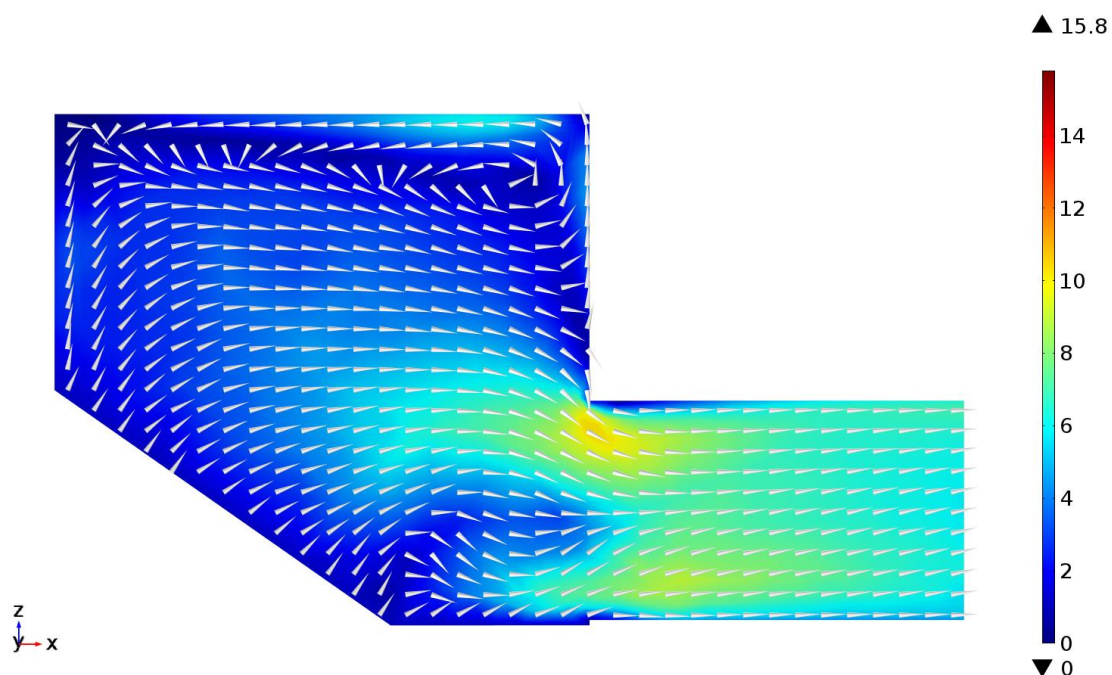
Je zřejmé, že výpočet obsahuje chybu, kterou lze přičíst nedostatečně jemnému nastavení sítě v místě přívodu 2° vzduchu. Pro jemnější síť lze předpokládat vyšší maximální hodnotu rychlosti (vyšší než teoretická střední hodnota \bar{u}). Tato chyba nenarušuje okrajovou podmínku hmotnostního průtoku 2° vzduchu.



Obr. 14 - Velikost rychlosti v komoře (m/s)

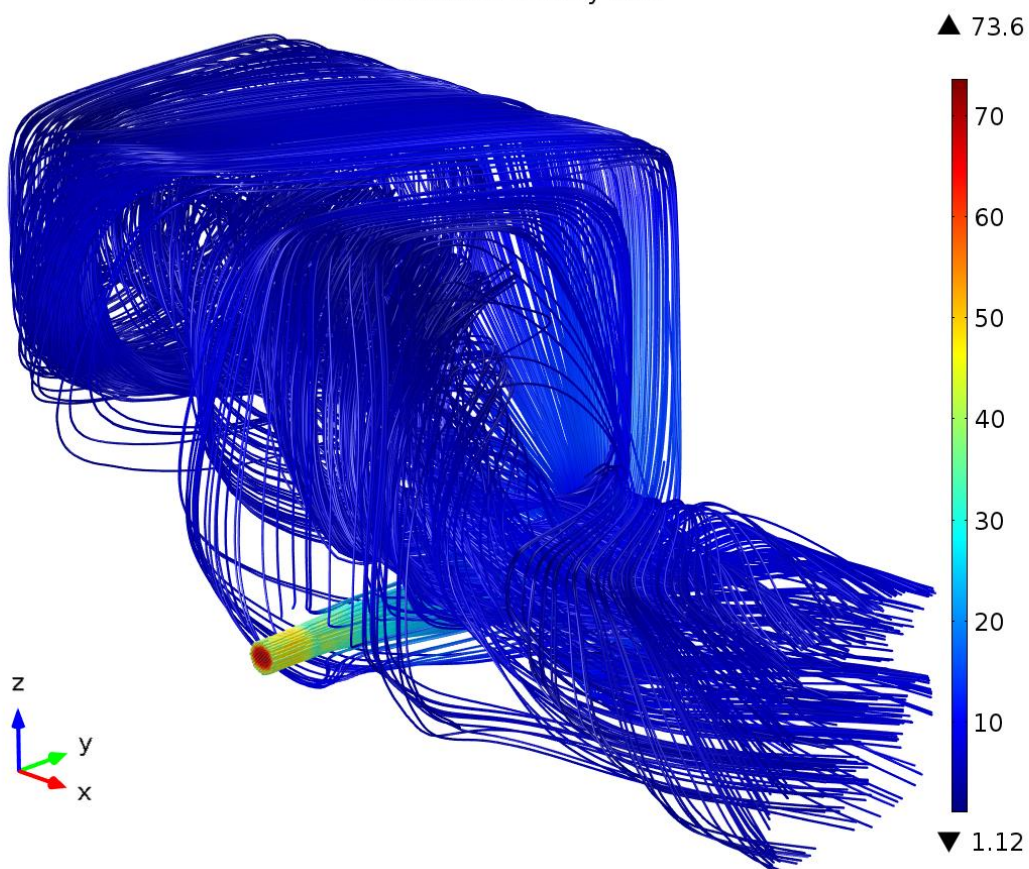


Obr. 15 - Směr (bíle) a velikost rychlosti v m/s (barevně) v místě přívodu 2° vzduchu

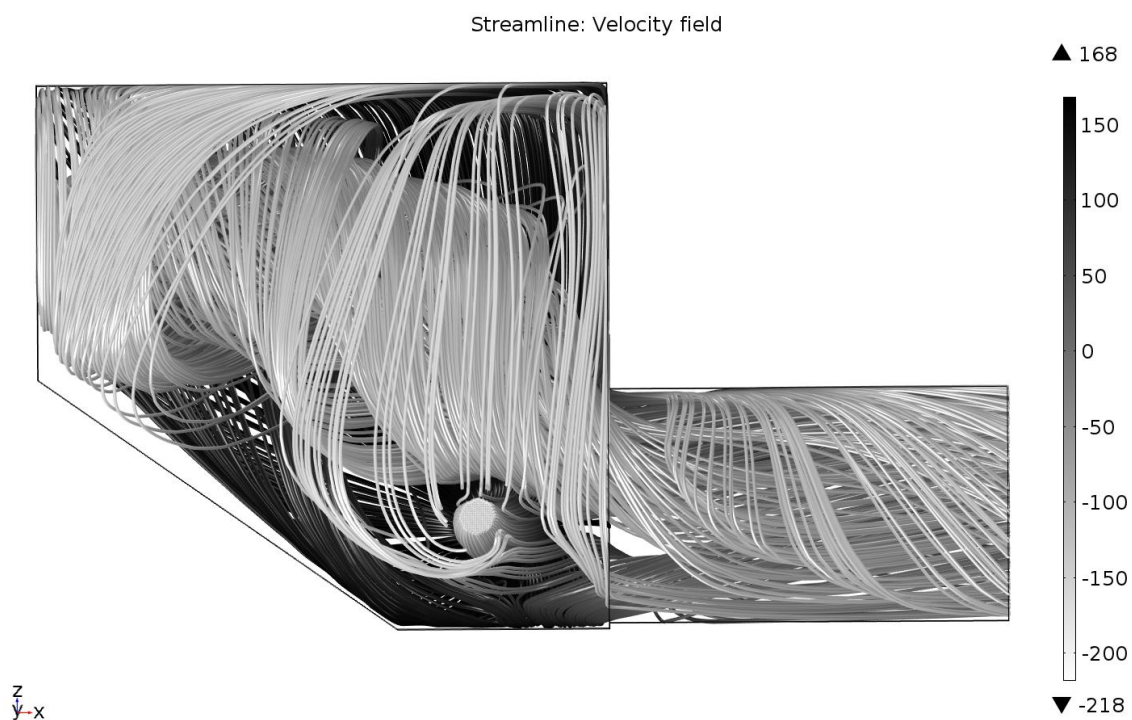


Obr. 16 - Směr (bíle) a velikost (barevně) složky rychlosti v rovině symetrie komory

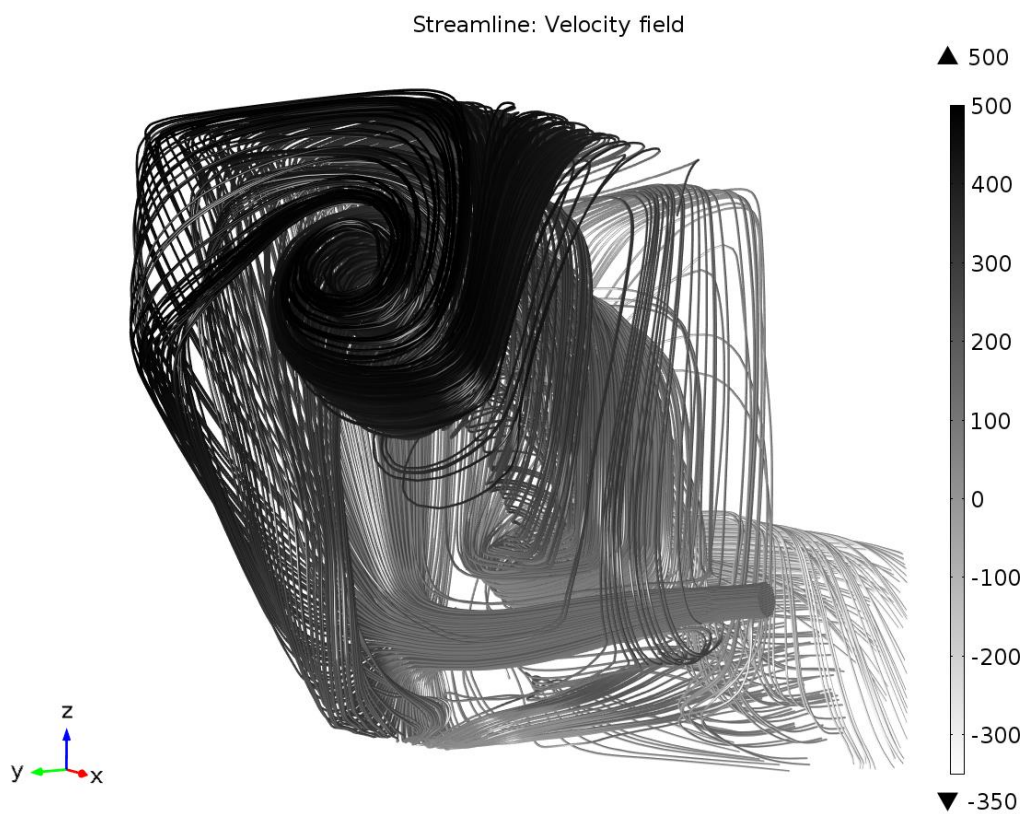
Streamline: Velocity field



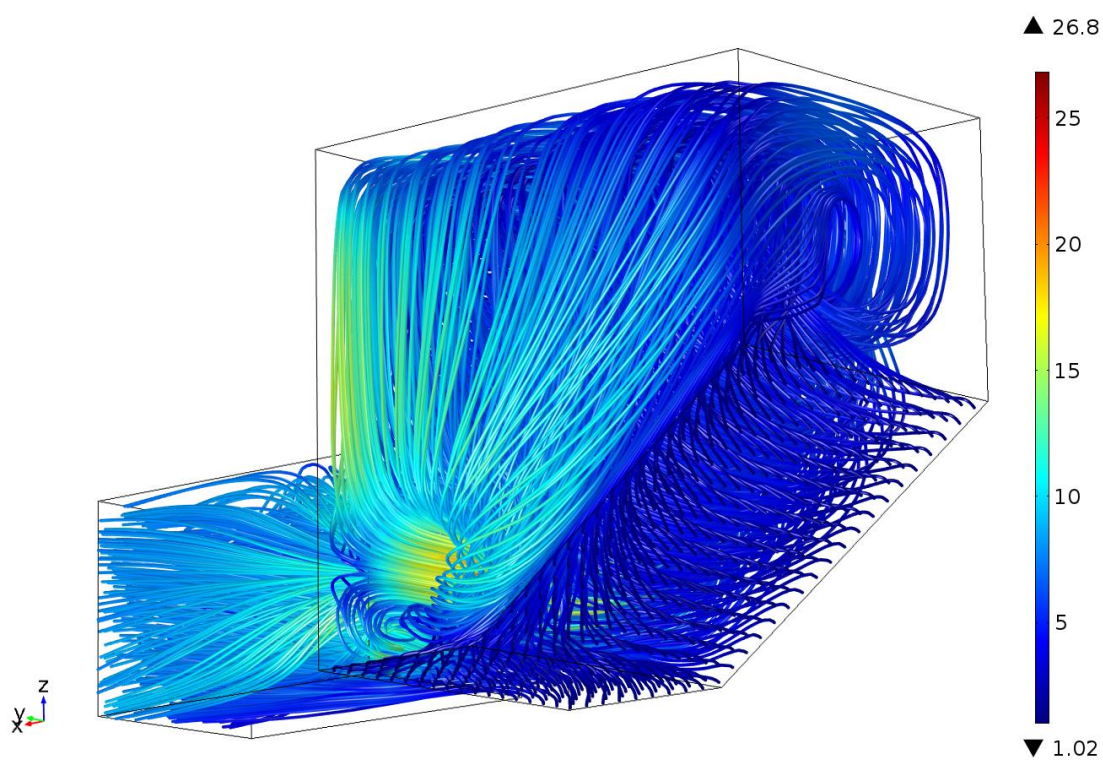
Obr. 17 - Proudnice 2° vzduchu (barevně velikost rychlosti v m/s)



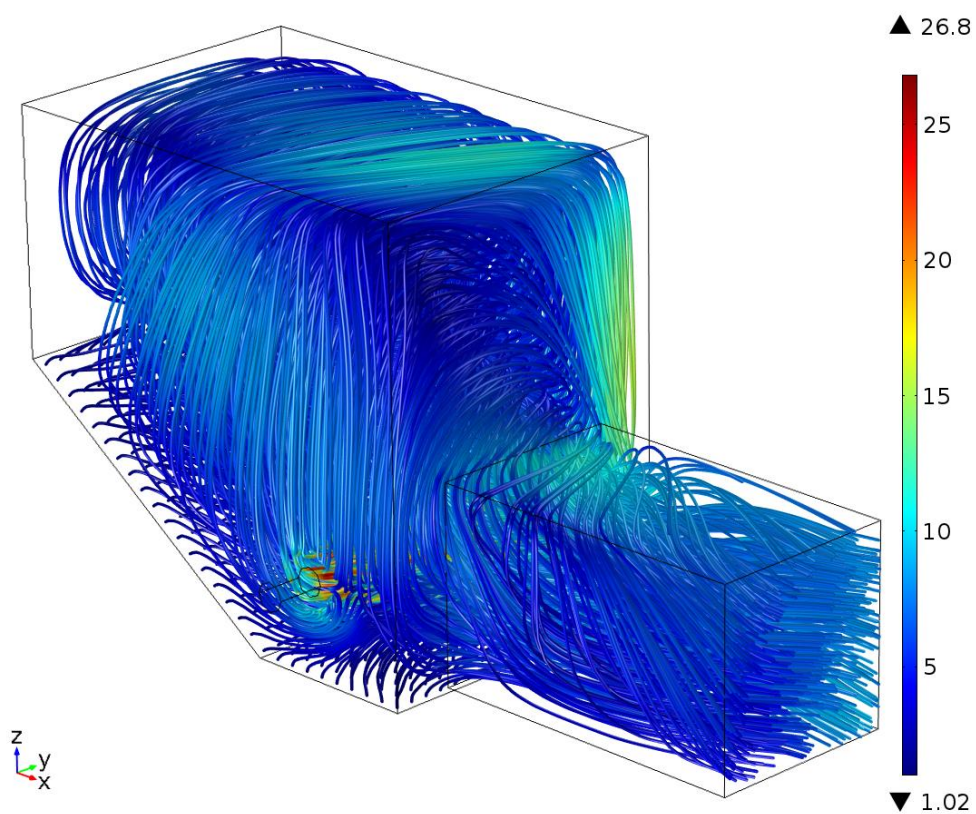
Obr. 18 - Proudnice 2° vzduchu (stupně šedi odpovídají y-ové souřadnici)



Obr. 19 - Proudnice 2° vzduchu (stupně šedi odpovídají x-ové souřadnici)

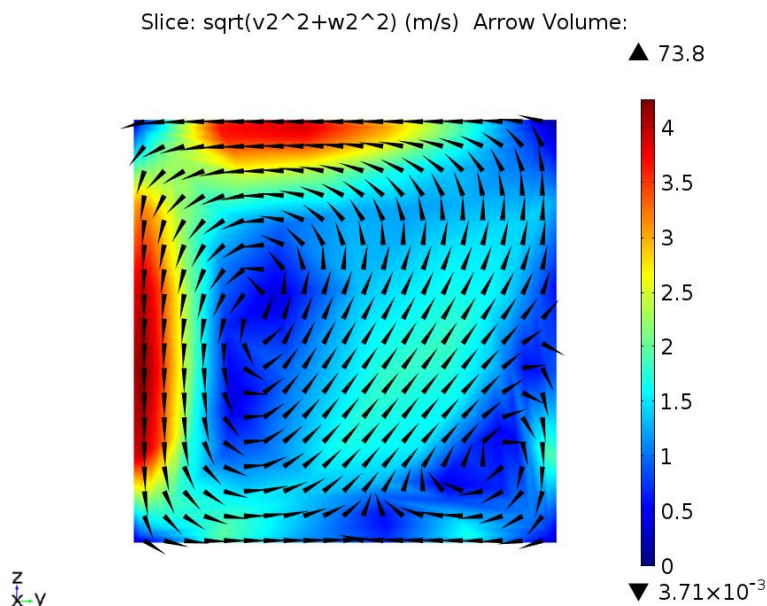


Obr. 20 - Proudnice dřevoplynu (barevná škála v m/s)



Obr. 21 - Proudnice dřevoplynu (barevná škála v m/s)

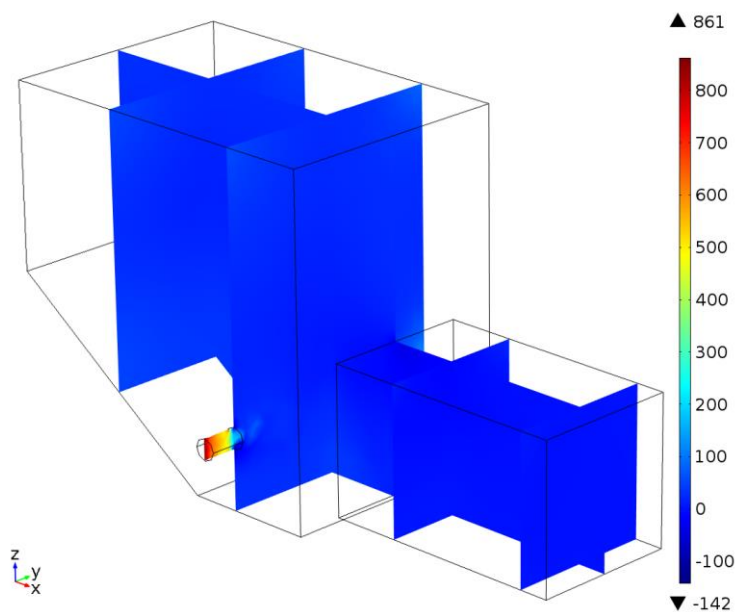
Část plynů z proudu 2° vzduchu nevstupuje do víru nad šikmým roštem, nýbrž teče podél stěny, míjí spalínovod a míří zpět k přívodu 2° vzduchu, kde je opět stržena rychlým proudem. Jiná část 2° vzduchu proudí přímo do spalínovodu. Charakteristika proudu plynu ve spalínovodu je ovlivněna touto částí 2° vzduchu i vírem prostupujícím komorou. Výsledné promísení plynů je zobrazeno v podkapitole 5.2.4.



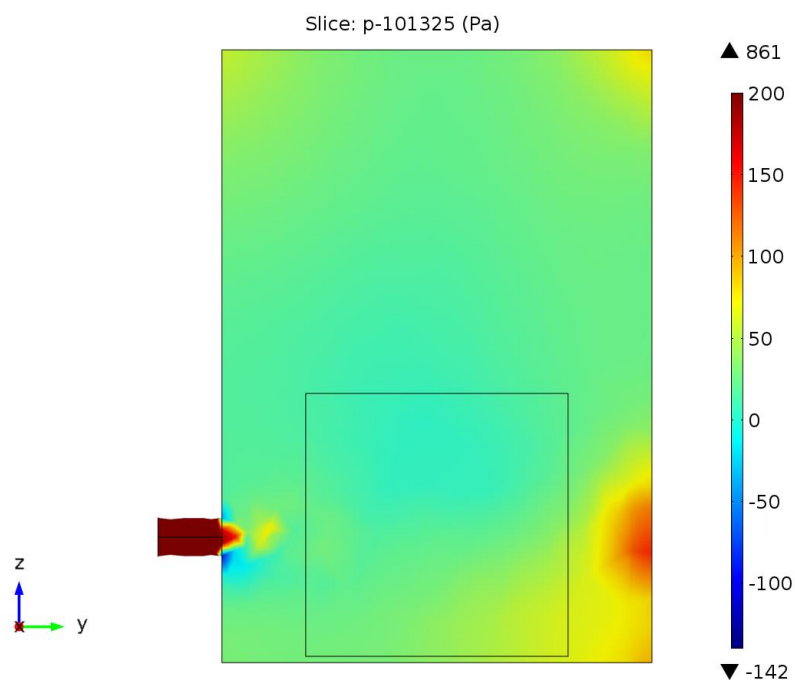
Obr. 22 - Rychlostní profil na konci spalínovodu

5.2.2. Tlak

Rozdíly v tlacích uvnitř komory se pohybují v řádech desítek Pa, přičemž nejpatrnější změny tlaku nastávají v okolí vstupu 2° vzduchu a na protější stěně – v místech, kde své extrémy má i rychlostní pole.

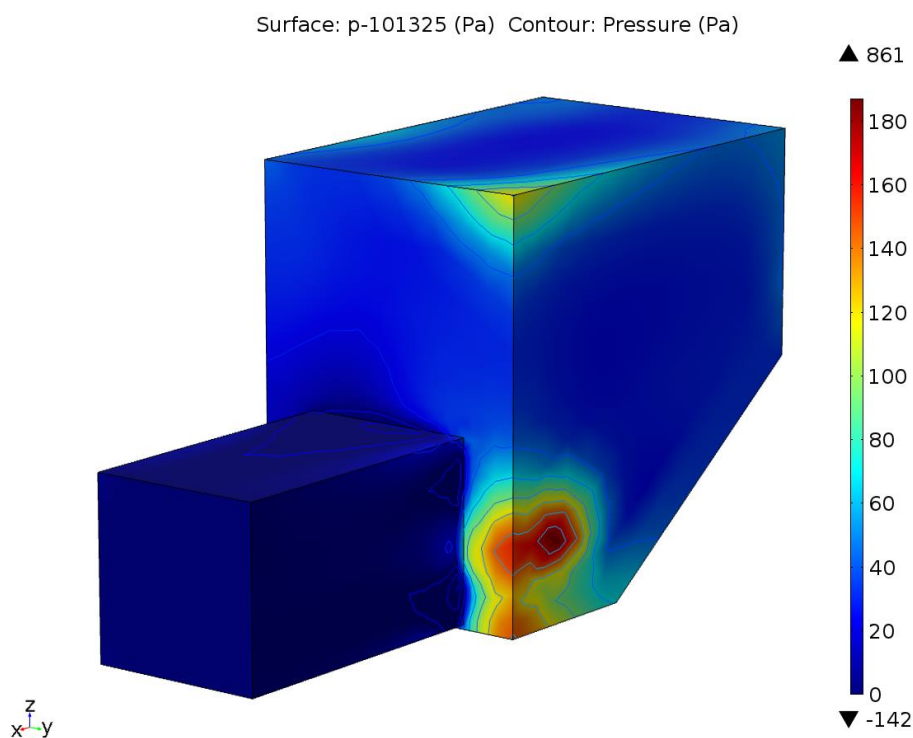


Obr. 23 - Relativní hodnoty tlaku ve zplyňovací komoře (Pa)

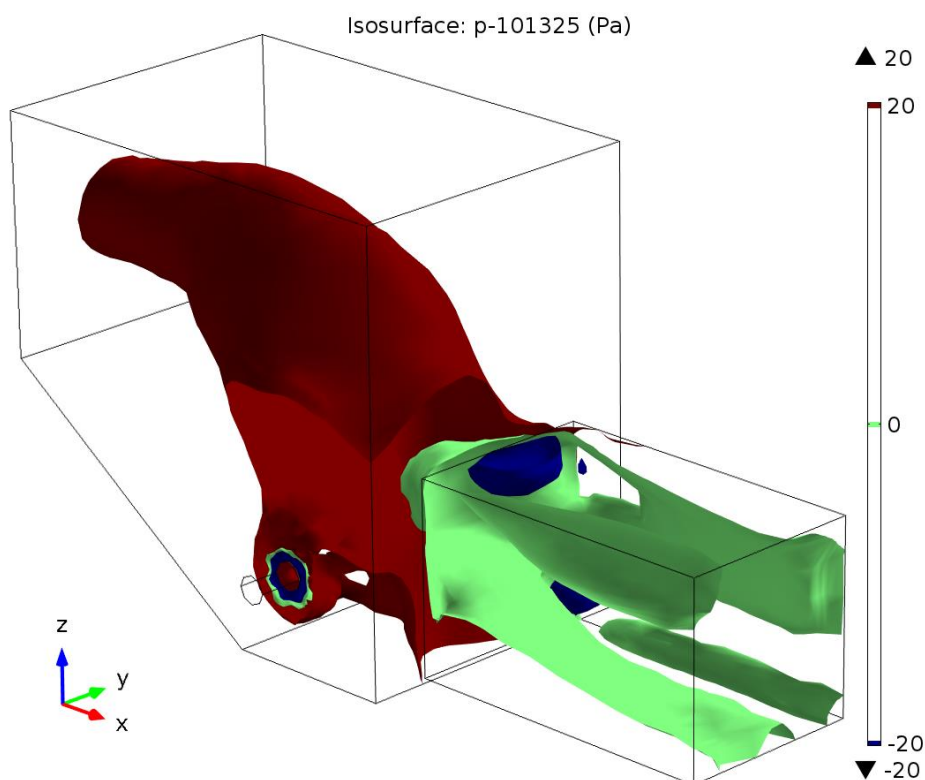


Obr. 24 - Relativní hodnoty tlaku v místě vstupu 2° vzduchu (škála omezena do 200 Pa)

Globální maximum tlaku nastává na začátku přívodu 2° vzduchu; softwarem určená hodnota přetlaku 861 Pa je však diskutabilní vzhledem k hrubému nastavení sítě. Nárůst tlaku dále nastává na protější stěně v místě, kde se tříští proud 2° vzduchu (Obr. 25). Zde je maximální vypočtená hodnota rovna 187 Pa.



Obr. 25 - Nárůst tlaku naproti přívodu 2° vzduchu (Pa)

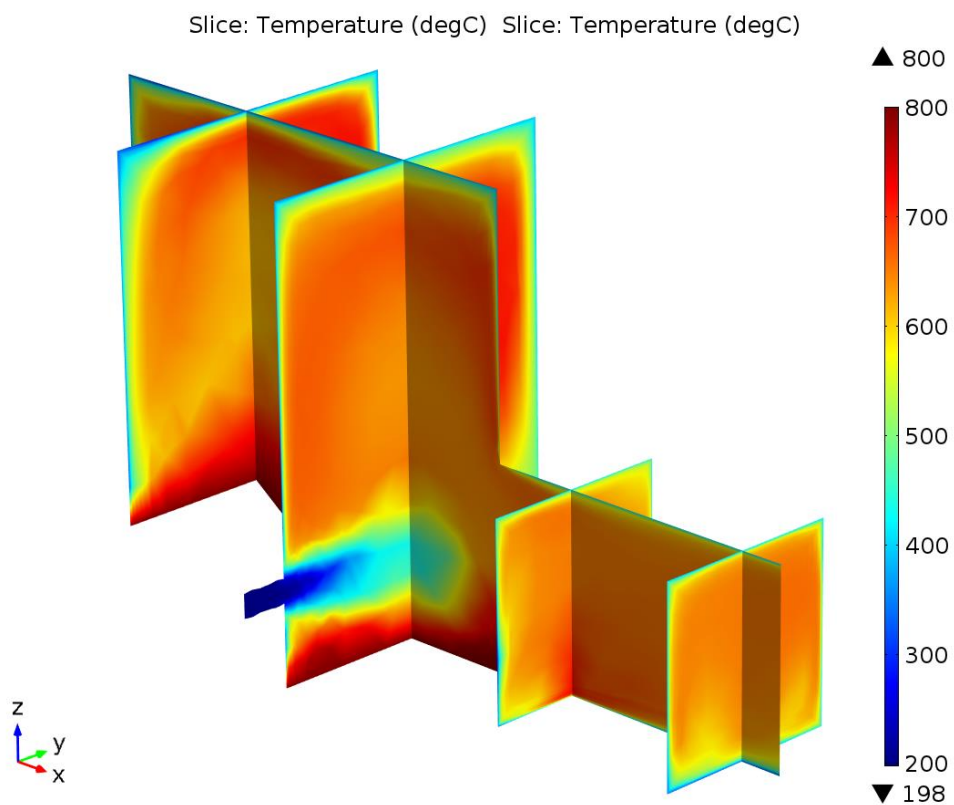


Obr. 26 - Znázornění oblastí podtlaku/přetlaku uvnitř komory (Pa)

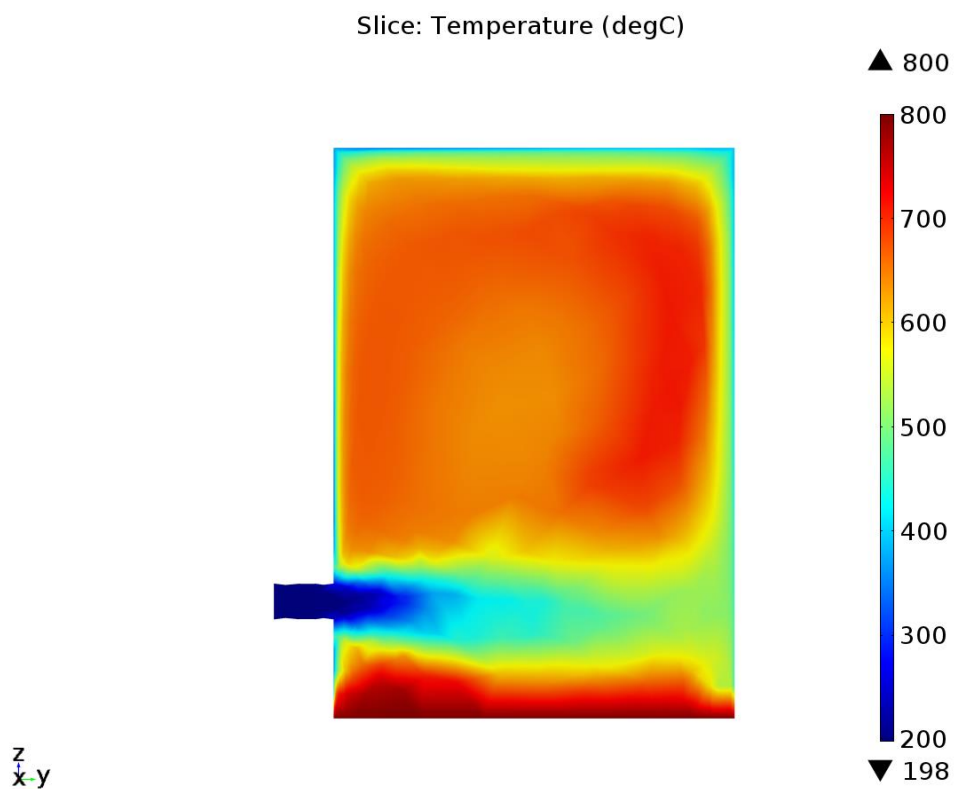
Na Obr. 26 jsou zobrazeny oblasti podtlaku a přetlaku v komoře. Místa s relativní hodnotou tlaku <0 jsou významná z hlediska přísávání falešného vzduchu netěsnostmi ve stěnách. Místa s podtlakem větším než 20 Pa se nachází těsně kolem přívodu 2° vzduchu, dále mezi stěnou komory a horní i boční stěnou spalínovodu. Zelená plocha rozlišuje oblasti podtlaku a přetlaku; červená plocha spojující oblasti s přetlakem 20 Pa slouží ke znázornění víru plynů v komoře. V ose víru je hodnota tlaku nižší než na obvodu.

5.2.3. Teplota a tepelné ztráty stěnami komory

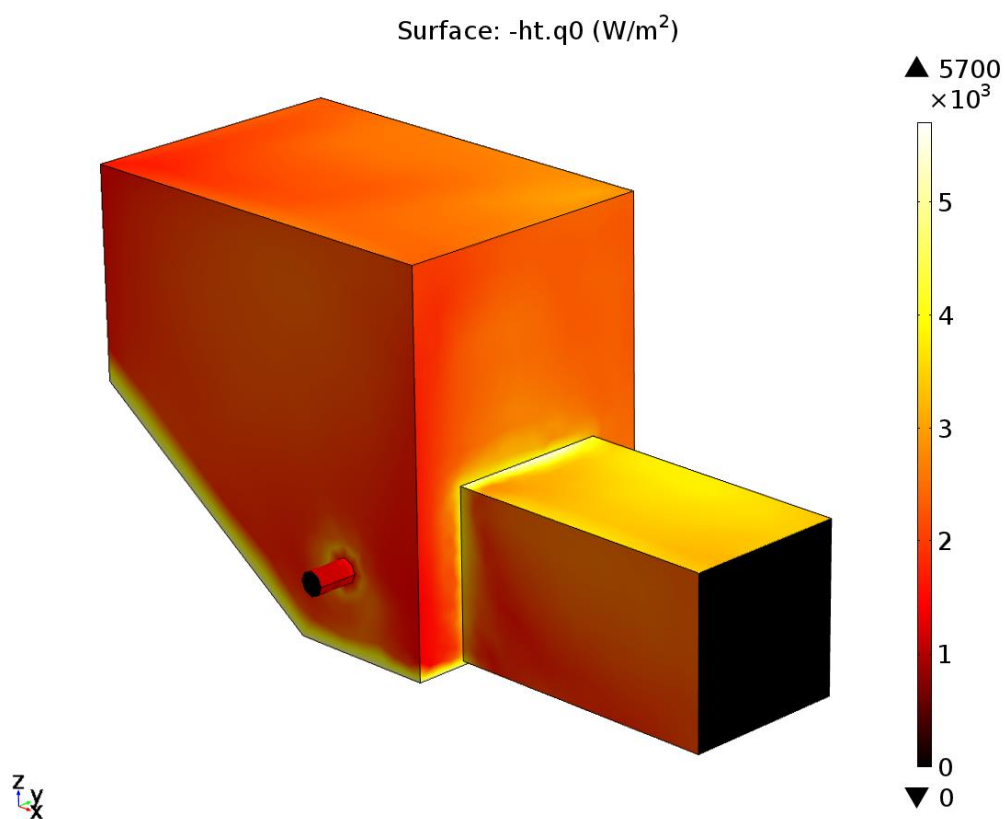
Teplota výrazně ovlivňuje proudění plynů. Vyvolává konvektivní proudění uvnitř komory, kdy teplejší plyn stoupá v důsledku nižší hustoty; dále na teplotě závisí vlastnosti plynu, jako je kinematická viskozita, jedna z veličin rozhodujících mezi laminárním a turbulentním prouděním. Proudění naopak zpětně určuje rozložení teplot; v turbulentních vírech se urychluje výměna tepla mezi plyny. V blízkosti stěn klesá teplota v důsledku odvádění tepla.



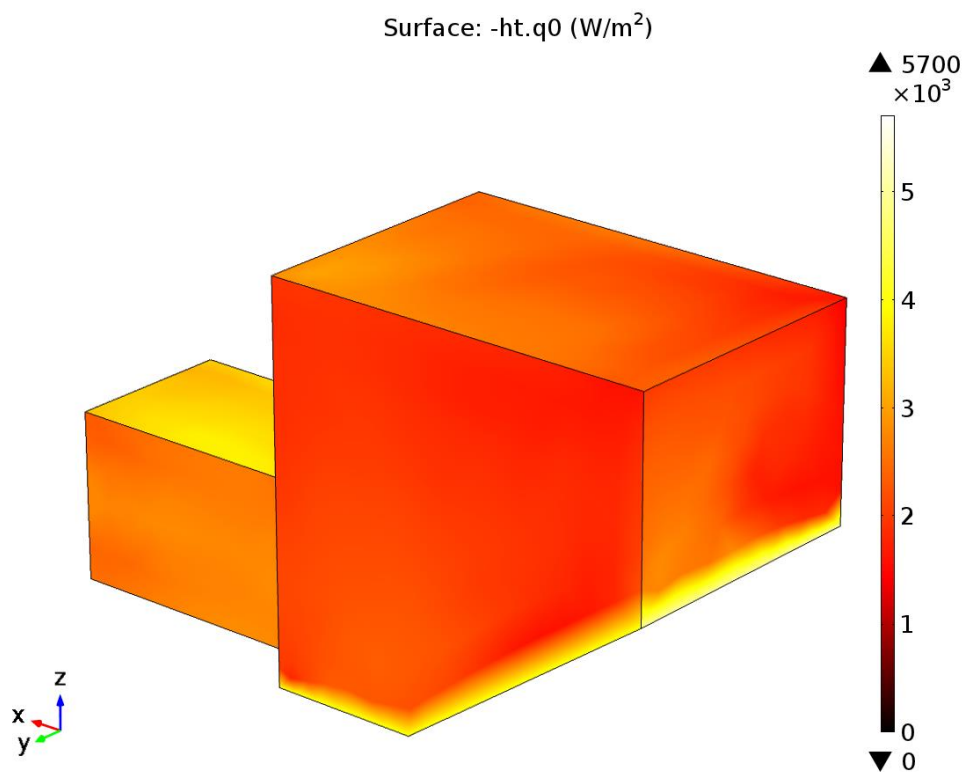
Obr. 27 - Rozložení teplot v komoře (°C)



Obr. 28 - Rozložení teplot v místě přívodu 2° vzduchu (°C)



Obr. 29 - Hustota tepelného toku stěnami kotle (W/m²)



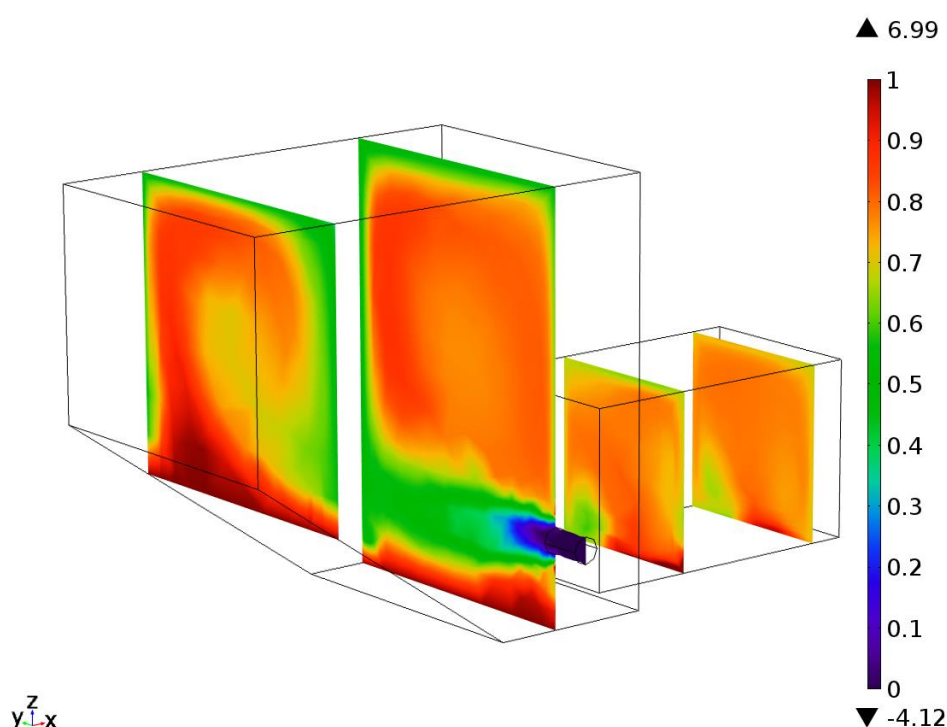
Obr. 30 - Hustota tepelného toku stěnami kotle (W/m²)

5.2.4. Hmotnostní zlomek dřevoplynu

Jde o veličinu nejlépe znázorňující míru promísení obou plynů vstupujících do zařízení. Turbulentní charakter proudění pozitivně ovlivňuje kvalitu promísení. Vliv rozdílné hustoty plynů na míru vzniku turbulencí závisí od vzájemné polohy a rychlosti obou plynů. Jak bylo uvedeno výše, v tomto případě vztlková působení posilují turbulenci. Difúzní koeficienty byly zadány jako konstanty.

Pro posouzení míry promísení (přebytek či nedostatek přimíchaného vzduchu) lze triviálním výpočtem stanovit výsledný poměr obou plynů jako podíl hmotnostních průtoků:

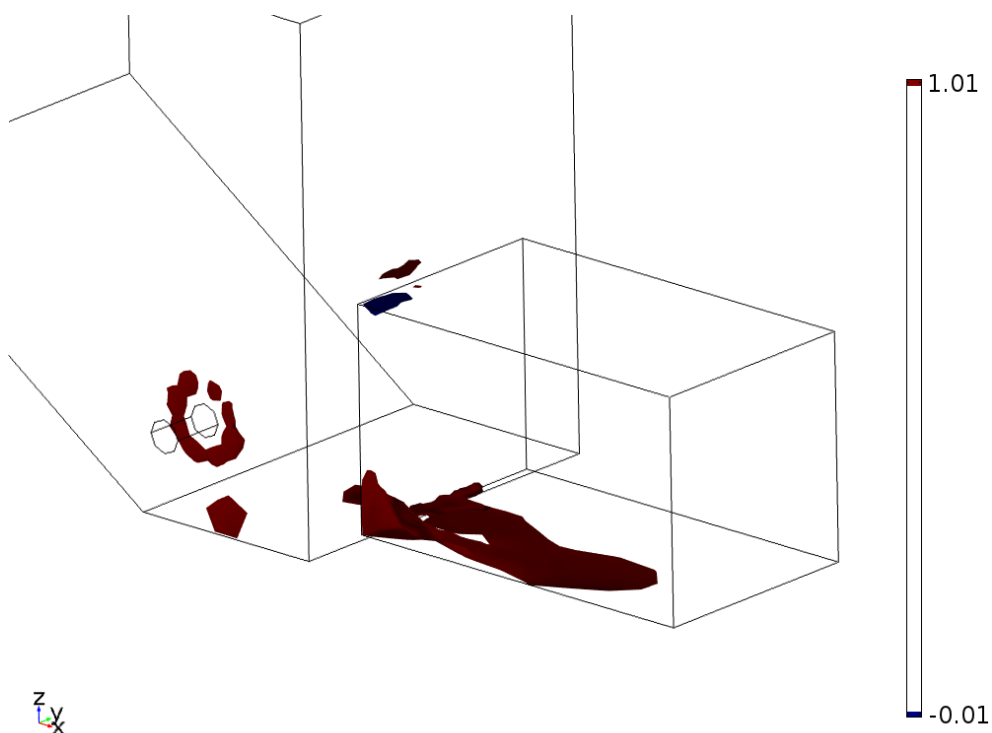
$$w_{22celk} = \frac{m_1}{m_1 + m_{2^o}} = \frac{14,14 \cdot 10^{-2}}{14,14 \cdot 10^{-2} + 5,47 \cdot 10^{-2}} \doteq 0,721 \quad (5.7)$$



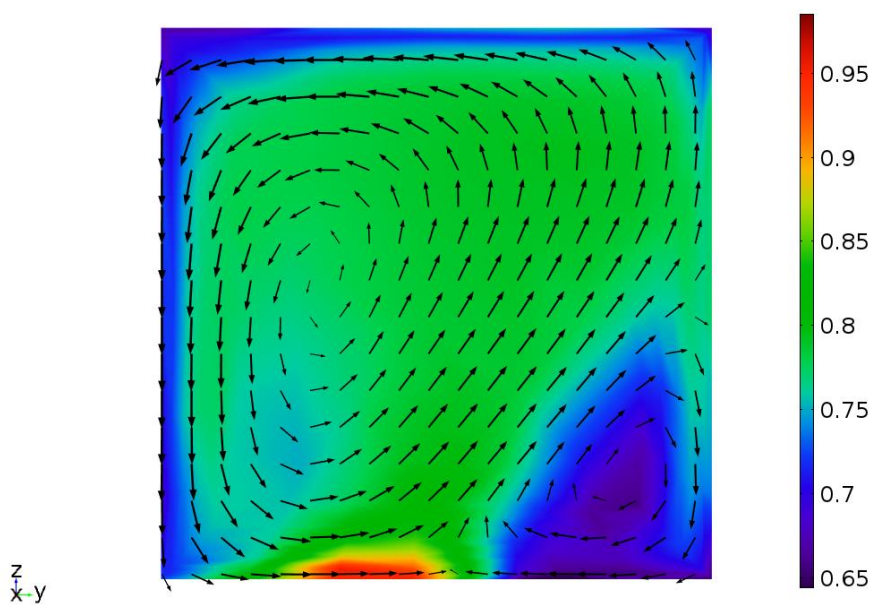
Obr. 31 - Hmotnostní zlomek dřevoplynu v komoře a spalínovodu

V malých oblastech při stropu a dně spalínovodu byl spočten hmotnostní zlomek mimo rozsah fyzikálně přípustných hodnot (0-1). Malé oblasti těsně u přívodu 2° vzduchu a stropu spalínovodu byly ignorovány, neboť se jedná o jednotlivé, izolované buňky výpočtové oblasti. K extrému 6,99 (u dna spalínovodu), jež ovlivňuje rozsáhlejší oblast, je přihlédnuto při vyhodnocování rozložení hmot. zlomku dřevoplynu na výstupu ze spalínovodu (Obr. 32).

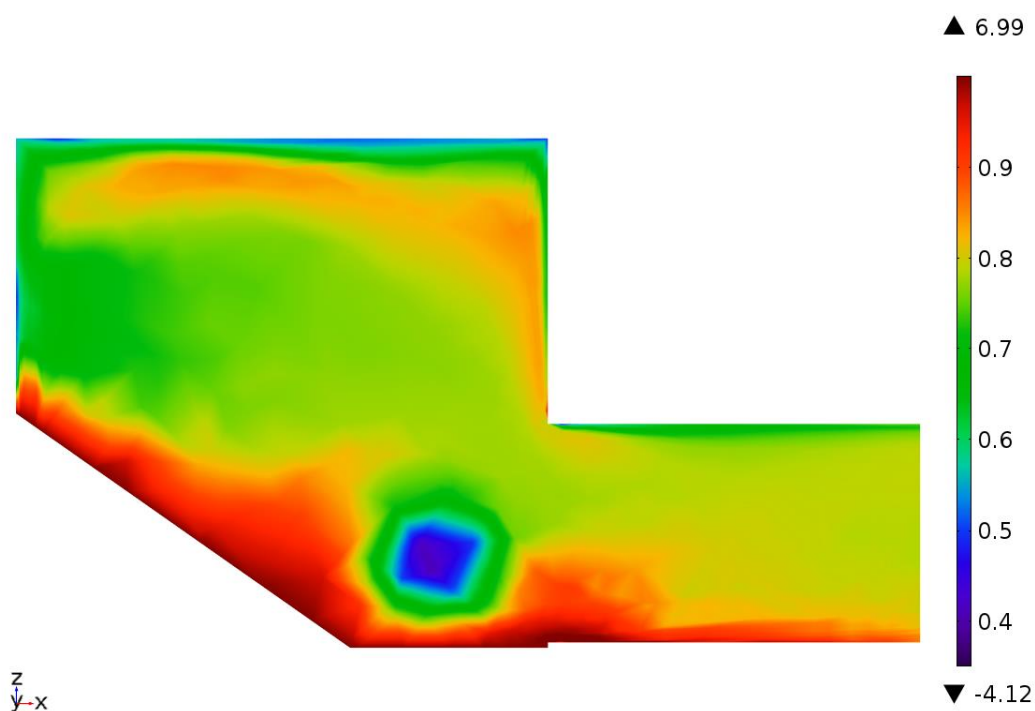
Výsledné rozložení koncentrace na konci spalínovodu je ovlivněno poměrem částí 2° vzduchu, jež vstupuje do velkého víru v komoře, a části, která proudí přímo do spalínovodu. Tato proudí v levém dolním rohu (při pohledu ven z komory) a vytváří levotočivý vír, v němž hmot. zlomek dřevoplynu dosahuje pouze 0,65-0,7. Větší část profilu zaujímá pravotočivý vír, kde hmot. zlomek dosahuje od 0,75 do 0,8. Lze předpokládat, že hodnoty kolem 0,95 při dně spalínovodu jsou důsledky vlivu chyby výpočtu – již zmíněného extrému 6,99.



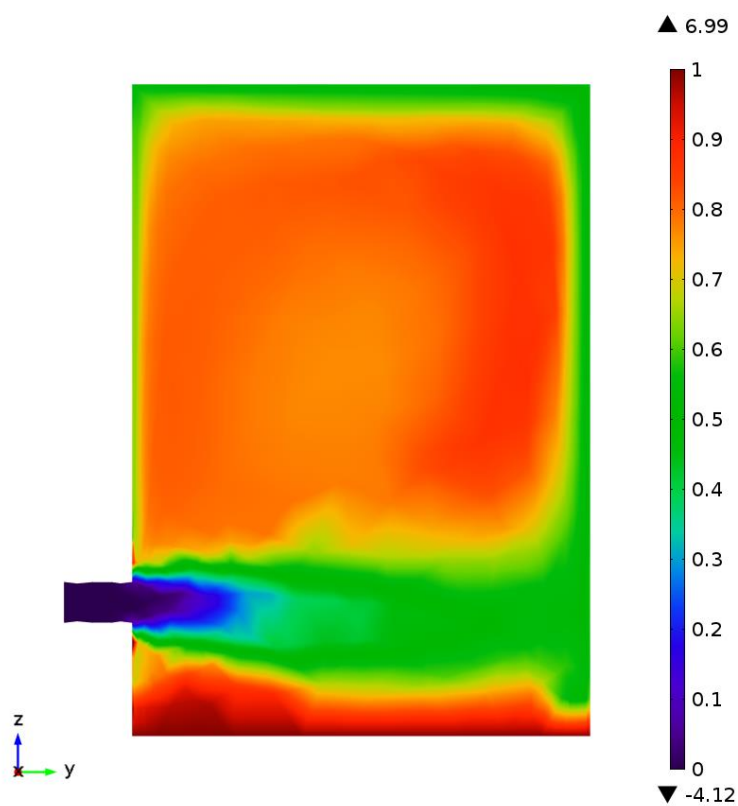
Obr. 32 - Oblasti hmot. zlomků mimo reálný rozsah (modře $w < 0$; červeně $w > 1$)



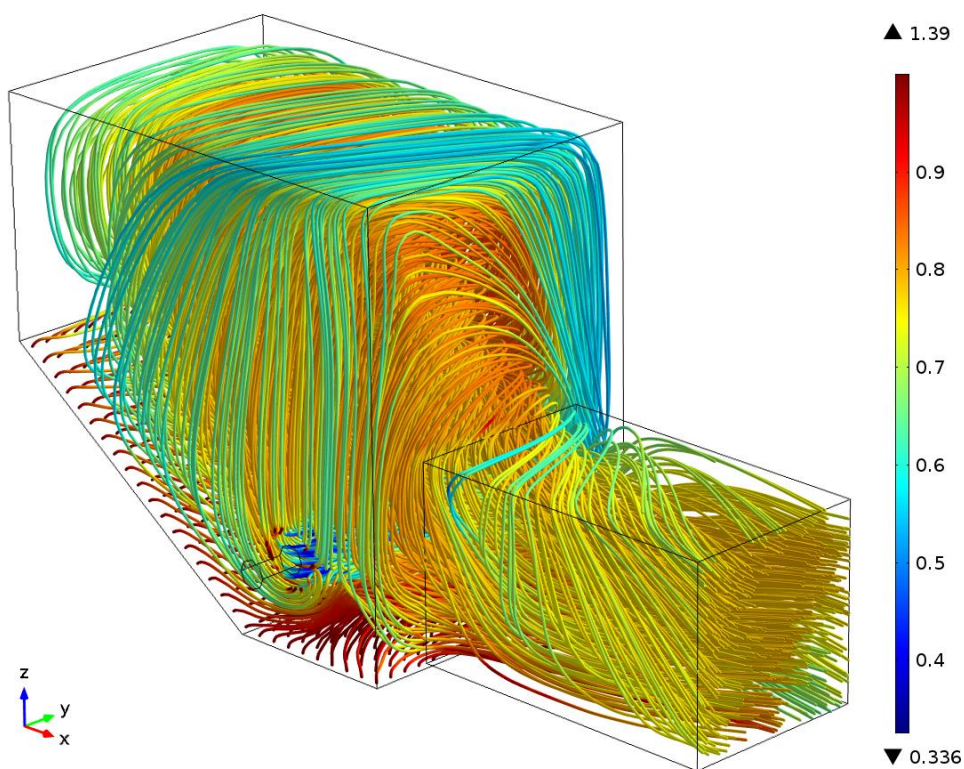
Obr. 33 - Hmot. zlomek na konci spalínovodu (černě znázorněno rychlostní pole)



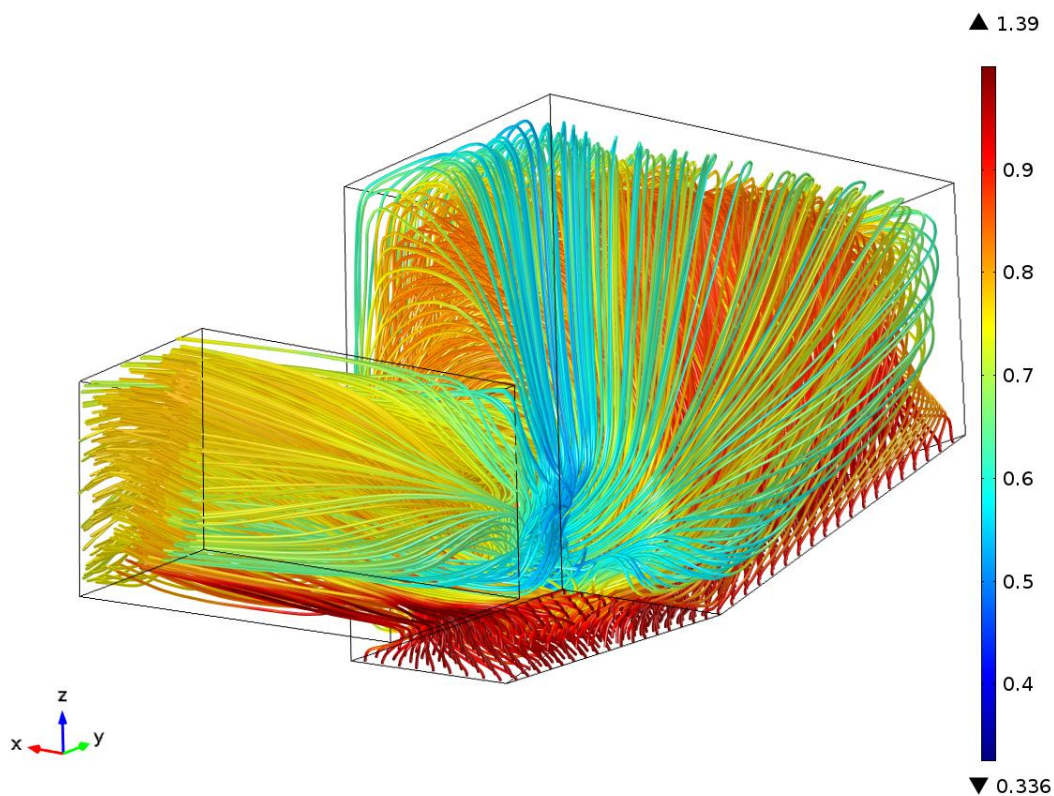
Obr. 34 - Hmot. zlomek v rovině symetrie komory



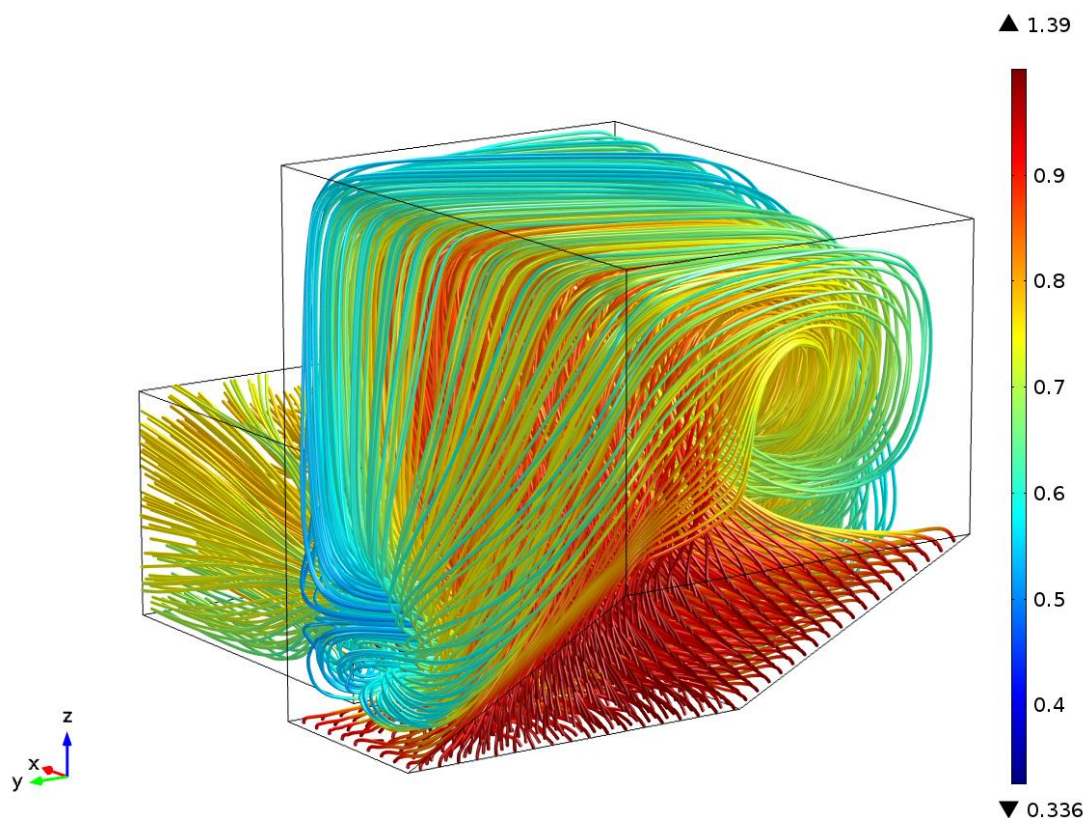
Obr. 35 - Hmot. zlomky v místě přívodu 2° vzduchu



Obr. 36 - Proudnice dřevoplynu se znázorněním hmot. zlomku



Obr. 37 - Proudnice dřevoplynu se znázorněním hmot zlomku



Obr. 38 - Proudnice dřevoplynu se znázorněním hmot. zlomku (pohled na vír u příkládacího otvoru)

5.3. Obecné zhodnocení výsledků

Ze zobrazených výsledků je patrné, že dominantní strukturou uvnitř komory je vír ve středu ohniště. Zdrojem energie víru je 2° vzduch proudící z přívodu v blízkosti dohořívacího roštu. Proud 2° vzduchu se nejprve tříští o stěnu komory, dále s sebou strhává dřevoplyn unikající rovnoměrně z celé plochy roštu (z definice okrajové podmínky). Vír nejprve obtéká stěny kotle, přičemž dochází k ochlazování plynů vlivem tepelných ztrát skrz stěny.

2° vzduch má tendenci pronikat dále od osy víru, zatímco dřevoplyn s nižší hustotou zůstává blíže středu. Od stěny s příkládacím otvorem se plyny odráží a vrací se středem prvního víru směrem ke spalínovodu. Do něj směs plynů proniká mezerou mezi stropem spalínovodu a rychlým proudem 2° vzduchu, který je okolními plyny obtékán podobně, jako by šlo o pevnou překážku. Jen malou část plynů z víru s sebou tento proud strhává.

V hlavním víru se plyn do okamžiku výstupu ze spalínovodu promísí do stavu, kdy se podíl dřevoplynu pohybuje mezi 75 a 80 hmot. %. V okolí stropu a pravé stěny spalínovodu (ve směru ven z komory) je koncentrace nižší, okolo 50 hmot. %. To je způsobeno zachycením části proudu 2° vzduchu, jež vstupuje do komory a jen částečně se mísí s hlavním vírem. Odlišný podíl dřevoplynu (65-70 hmot. %) je v levém dolním rohu výstupu ze spalínovodu, kam vstupuje zejména proud 2° vzduchu částečně smísený s dřevoplynem, jež není součástí hlavního víru v komoře.

6. Závěr

Cílem práce bylo vytvořit numerický model mísení plynů o rozdílných vlastnostech (chemické složení, teplota, ...). Úloha byla aplikována na problematiku proudění uvnitř zplyňovací komory ZKG.

Nejprve bylo třeba shromáždit potřebné informace o palivu, tj. biomase, jejíž vlastnosti a složení výrazně ovlivňují jevy při jejím spalování či zplyňování; různé druhy paliva se liší výhřevností, teplotou hoření, vlhkostí, chemickým složením i výslednými produkty procesu. Pro tento případ je jako palivo využita dřevní štěpka, piliny či peletky. Informace dále mohou čtenáři posloužit jako stručný přehled problematiky energetického využití biomasy.

Rešerše pokračuje rozbořem technologie spalování biomasy. Nejprve je popsán samotný proces spalování; dále pak jednotlivé typy použitelných zařízení. Důraz je kladen na roštová ohniště, jež představují nejstarší a nejjednodušší typ ohnišť pro spalování pevných kusových paliv. Součástí kapitoly je i rozbor problematiky spalovacího vzduchu, jeho dělení a předeřívání před vstupem do ohniště. Poslední část teorie je věnována úvodu do CFD modelování mísení dvou plynů; kapitola je rozdělena podle jednotlivých fyzikálních jevů, k nimž jsou přiřazena základní rozdělení a popis používaných numerických modelů.

Dále jsou uvedeny základní technické parametry zplyňovací komory. Samotná praktická část začíná rozbořem jevů podstatných pro tuto práci a jejich přiřazením k vhodné „fyzice“ v softwaru COMSOL Multiphysics. Následuje popis a zdůvodnění zjednodušení modelu a výpočty pro určení okrajových podmínek i fyzikálně-chemických vlastností obou plynů.

Výsledky simulace poukazují na poněkud nevhodné umístění přívodu 2° vzduchu vůči spalínovodu a roštu. Vlivem značné rychlosti vstupujícího vzduchu a odrážejícího se od stěny kotle vzniká v prostoru ohniště vír obtékající stěny komory. Toto obtékání vede k intenzivnějšímu odvádění tepla z plynu stěnami komory do okolního prostředí. Druhou nevýhodou zadaného umístění přívodu je fakt, že část vzduchu míří přímo do spalínovodu a není tak umožněno intenzivnější mísení s dřevoplynem. V důsledku toho na konci spalínovodu dostáváme zřetelně nehomogenní rozložení koncentrací obou plynů.

Tato práce tvoří další krok v modelování proudění uvnitř zplyňovací komory ZKG. Prostým prouděním plynu v komoře se zabývala práce [10], jež měla za úkol objasnit základní charakteristiky proudění uvnitř zkoumaného zařízení. Dalším krokem tedy bylo model rozšířit o další jevy, jež jsou v průběhu zplyňování bezprostředně přítomny – přenos tepla a mísení chemických látek.

Použitý model pracuje s některými zjednodušujícími předpoklady, z nichž lze jmenovat zejména okrajové podmínky na roštu. Hustota hmotnostního toku a chemické složení plynu je uvažováno homogenní po celé ploše roštu, což v praxi nelze očekávat. Proto by bylo vhodné blíže analyzovat proudění plynu skrze rošt a vrstvu paliva a pomoci tak vytvořit ucelenější a přesnější model proudění uvnitř komory.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ČESKO. Vyhláška č. 133 / 2010 o požadavcích na pohonné hmoty, o způsobu sledování a monitorování složení a jakosti pohonných hmot a o jejich evidenci (vyhláška o jakosti a evidenci pohonných hmot). *Sbírka zákonů České republiky*. [Online] 5. 5 2010. [Citace: 27. 12 2016.] ISSN: 1211-1244.
- [2] BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2009. str. 109. ISBN 978-80-214-3955-9.
- [3] ČESKO. Vyhláška č. 477/2012 o stanovení druhů a parametrů podporovaných obnovitelných zdrojů pro výrobu elektřiny, tepla nebo biometanu a o stanovení a uchovávání dokumentů. *Sbírka zákonů České republiky*. [Online] 20. 12 2012. [Citace: 29. 12 2016.] , částka 180, 6354-6368 s. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/download.py?file=docu/predpisy/download/V477-2012.pdf>.
- [4] VOLÁKOVÁ, Pavlína. Prvkové složení biomasy. *Biom.cz*. [Online] 8. 9 2010. [Citace: 4. 1 2017.] Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/prvkove-slozeni-biomasy>>. ISSN: 1801-2655.
- [5] PETŘÍKOVÁ, Vlasta. Využití biomasy pro energii. *Biom.cz*. [Online] 3. 10 2002. [Citace: 29. 12 2016.] Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyuziti-biomasy-pro-energie>. ISSN: 1801-2655.
- [6] ČERNÝ, Václav, JANEBA, Břetislav, TEYSSLER, Jiří. *Parní Kotle*. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1983. Technický průvodce.
- [7] HRDLÍČKA, Jan. Biomasa a uhlí v kotlích malých výkonů. *TZB-info*. [Online] 28. 7 2014. [Citace: 6. 2 2017.] Dostupné z: <http://vytapeni.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/11527-biomasa-a-uhli-v-kotlich-malych-vykonu>.
- [8] VILIMEC, Ladislav. *Stavba kotlů II*. 2. vyd. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2008. str. 152. ISBN 978-80-248-1716-3.
- [9] BERANOVSKÝ, Jiří, MURTINGER, Karel. *Energie z biomasy*. 1. vydání. Brno : ERA, 2006. ISBN 80-7366-071-7.
- [10] KRIŠPÍN, Jan. *Modelování proudění vzduchu ve spalovací komoře ZKG*. Brno : Bakalářská práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav, 2015. str. 51. Vedoucí práce Ing. Michal ŠPILÁČEK.
- [11] GAŠPAROVIČ, Lukáš, JELEMENSKÝ, Ľudovít, MARKOŠ, Jozef. Energetické využitie rastlinnej biomasy 2 – Termické procesy. *Biom.cz*. [Online] 20. 5 2013. [Citace: 29. 12 2016.] Dostupné z: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/energeticke-vyuzitie-rastlinnej-biomasy-2-termicke-procesy>>. ISSN: 1801-2655.
- [12] OCHODEK, Tadeáš, SKÁLA, Zdeněk. *Energetické parametry biomasy: projekt GAČR 101/04/1278*. V Brně : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007. Knihovnicka.cz. ISBN: 978-80-214-3493-6.
- [13] GAŠPAROVIČ, Lukáš, JELEMENSKÝ, Ľudovít, MARKOŠ, Jozef. Energetické využitie rastlinnej biomasy 1 - Chemické zloženie a technológie. *Biom.cz*. [Online] 4. 3 2003. [Citace: 8. 1 2017.] Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/energeticke-vyuzitie-rastlinnej-biomasy-1-chemicke-zlozenie-a-technologie>>. ISSN: 1801-2655.
- [14] SKÁLA, Zdeněk. *Termokinetika spalování*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 1984. str. 116.

- [15] VOLÁKOVÁ, Pavlína. Biomarový popel – prvkové složení a možnosti jeho využití. *Biom.cz*. [Online] 14. 4 2010. [Citace: 31. 1 2017.] Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/biomarovy-popel-prvkove-slozeni-a-moznosti-jeho-vyuziti>. ISSN: 1801-2655.
- [16] TOMAN, Zdeněk. Mechanismus a podmínky dokonalého spalování biomasy. *Biom.cz*. [Online] 7. 2 2011. [Citace: 22. 12 2016.] <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/mechanismus-a-podminky-dokonaleho-spalovani-biomasy>. ISSN: 1801-2655.
- [17] Výkladový slovník environmentálních výrazů. *EnviWeb - výkladový slovník environmentálních výrazů*. [Online] [Citace: 30. 1 2017.] Dostupné z: <http://www.enviweb.cz/eslovník/>. ISSN 1803-6686.
- [18] NAJSER, Jan. *Sesuvný zplyňovač s řízeným podáváním paliva*. Brno : VUT v Brně, 2009. Sborník příspěvků ze semináře „Energie z biomasy X“. ISBN 978-80-214-4027-2.
- [19] VILIMEC, Ladislav. *Stavba kotlů I. 2.*, přeprac. a dopl. vyd. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2002. ISBN 978-80-248-2550-2.
- [20] KOZUBKOVÁ, Milada. *Modelování proudění tekutin, FLUENT, CFX*. Ostrava, 1.vyd. : VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2008. str. 153. ISBN 978-80-248-1913-6.
- [21] BLEJCHAŘ, Tomáš. *Turbulence - Modelování proudění CFX*. Ostrava : Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012. str. 262. ISBN 978-80-248-2606-6.
- [22] KOIŠ, Jiří. *Výpočtový model kotle KWH*. Brno : VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. str. 86. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Lisý, Ph.D.
- [23] PAVELEK, Milan a kol. *Termomechanika*. Brno : VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. str. 192. ISBN 978-80-214-4300-6.
- [24] LISÝ, Martin, BALÁŠ, Marek, KOHOUT, Přemysl, SKÁLA, Zdeněk. *ENERGIE Z BIOMASY IV*. Brno : Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně, 2005. str. 144. Sborník příspěvků ze semináře. ISBN 80-214-3067-2.
- [25] ŠOB, František. *Hydromechanika*. Brno : VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. str. 238. ISBN 978-80-214-3578-0.

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obr. 1 - Řetězová reakce hoření vodíku [14]	17
Obr. 2 – Odrazová funkce přední klenby pro horní zápal [6]	22
Obr. 3 - Pevné rovinné rošty [19].....	23
Obr. 4 - Pevný stupňovitý rošt [19].....	23
Obr. 5 - Schéma konstrukce pásového roštu [19]	24
Obr. 6 - Schéma přesuvného roštu [16].....	25
Obr. 7 - Ukázky konstrukce vratisuvného roštu [15]	25
Obr. 8 - Pohazovací zařízení a) mechanické, b) pneumatické [2].....	26
Obr. 9 - Vzduchové poměry roštu bez pásmování [6]	27
Obr. 10 - Schéma zplyňovací komory [10]	31
Obr. 11 - Původní model kotle [10]	33
Obr. 12 - Zbýlá nadrošťová část bez přívodu paliva	33
Obr. 13 - Znázornění ploch A-F pro tepelné ztráty	35
Obr. 14 - Směr (bíle) a velikost rychlosti v m/s (barevně) v místě přívodu 2° vzduchu	37
Obr. 15 - Velikost rychlosti v komoře [m/s]	37
Obr. 16 - Proudnice 2° vzduchu (barevně velikost rychlosti v m/s)	38
Obr. 17 - Směr (bíle) a velikost (barevně) složky rychlosti v rovině symetrie komory.....	38
Obr. 18 - Proudnice 2° vzduchu (stupně šedi odpovídají x-ové souřadnici).....	39
Obr. 19 - Proudnice 2° vzduchu (stupně šedi odpovídají y-souřadnici)	39
Obr. 20 - Proudnice dřevoplynu (barevná škála v m/s).....	40
Obr. 21 - Proudnice dřevoplynu (barevná škála v m/s).....	40
Obr. 22 - Rychlostní profil na konci spalínovodu	41
Obr. 23 - Relativní hodnoty tlaku ve zplyňovací komoře (Pa)	41
Obr. 24 - Relativní hodnoty tlaku v místě vstupu 2° vzduchu (škála omezena do 200 Pa)	42
Obr. 25 - Nárůst tlaku naproti přívodu 2° vzduchu (Pa)	42
Obr. 26 - Znázornění oblastí podtlaku/přetlaku uvnitř komory (Pa).....	43
Obr. 27 - Rozložení teplot v místě přívodu 2° vzduchu (°C).....	44
Obr. 28 - Rozložení teplot v komoře (°C).....	44
Obr. 29 - Hustota tepelného toku stěnami kotle (W/m^2).....	45
Obr. 30 - Hustota tepelného toku stěnami kotle (W/m^2).....	45
Obr. 31 - Hmotnostní zlomek dřevoplynu v komoře a spalínovodu	46
Obr. 32 - Oblasti hmot. zlomků mimo reálný rozsah (modře $w < 0$; červeně $w > 1$)	47
Obr. 33 - Hmot. zlomek na konci spalínovodu (černě znázorněno rychlostní pole).....	47
Obr. 34 - Hmot. zlomek v rovině symetrie komory	48
Obr. 35 - Hmot. zlomky v místě přívodu 2° vzduchu	48
Obr. 36 - Proudnice dřevoplynu se znázorněním hmot. zlomku.....	49
Obr. 37 - Proudnice dřevoplynu se znázorněním hmot. zlomku.....	49
Obr. 38 - Proudnice dřevoplynu se znázorněním hmot. zlomku (pohled na vír u příkladacího otvoru)	50

POUŽITÉ ZKRATKY A SYMBOLY

Zkratka	Význam
BSL	Baseline model
C_xO_y	obecné označení kyslíko-uhlíkové sloučeniny
DNS	Přímá numerická simulace (Direct Numerical Simulation)
LES	Metoda velkých vírů (Large Eddy Simulation)
NO_x	oxidy dusíku
RANS	Metoda časového středování (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations)
RNG	Re-Normalization Group model
SST	Shear Stress Transport model

Označení veličiny	Jednotka	Název
A	kg	množství popela
c	$[kmol \cdot m^{-3}]$	molární koncentrace
c_v	[-]	empirická konstanta
f	$[kg^{-1}]$	popelový faktor
F_{vol}	$[N \cdot m^{-3}]$	objemová síla
g	$[m \cdot s^{-2}]$	tíhové zrychlení
I_{sp}	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	entalpie spalín
J	$[kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$	difúzní tok
k	$[J \cdot kg^{-1}]$	měrná kinetická energie turbulentního pohybu
k_{1°	[-]	podíl primárního vzduchu
l	[m]	délka/délkové měřítko
m	[kg]	hmotnost
M	$[g \cdot mol^{-1}]$	molární hmotnost
M_p	$[kg \cdot kg^{-1}]$	obsah popelovin v palivu
m_1	$[kg \cdot s^{-1}]$	hmotnostní tok plynů z roštu
m_{1°	$[kg \cdot s^{-1}]$	hmotnostní tok primárního vzduchu
m_{2°	$[kg \cdot s^{-1}]$	hmotnostní tok sekundárního vzduchu
M_{mix}	$[g \cdot mol^{-1}]$	molární hmotnost dřevoplynu
m_{pal}	$[kg \cdot s^{-1}]$	hmotnostní tok paliva
m_{VV}	$[kg \cdot kg_{pal}^{-1}]$	množství vzduchu na jednotkové množství paliva
N^r	[hmot. %]	obsah dusíku v palivu
O_{N2}	$[m^3_N \cdot kg^{-1}]$	teoretický objem dusíku ve spalovacím vzduchu

q	$[\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$	hustota tepelného toku
Q	$[\text{J} \cdot \text{s}^{-1}]$	tepelný tok
Q_r^i	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	výhřevnost
Q_s	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	spalné teplo
Re	$[-]$	Reynoldsovo číslo
S_r^i	$[\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$	obsah síry
S_{spf}	$[\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1}]$	měrná sirnatost
t_1	$[\text{°C}]$	teplota na roštu
t_2	$[\text{°C}]$	teplota sekundárního vzduchu
t_a	$[\text{°C}]$	teplota měknutí
t_b	$[\text{°C}]$	teplota tavení
t_c	$[\text{°C}]$	teplota tečení
u	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	rychlost/rychlostní měřítko
V	$[\text{m}^3]$	objem
$V_{\text{sp min}}$	$[\text{m}^3_{\text{vz}} \cdot \text{kg}^{-1}]$	minimální objem spalín
V_{vz}	$[\text{m}^3_{\text{vz}} \cdot \text{kg}^{-1}]$	skutečný objem vzduchu pro zplyňování
$V_{\text{vz min}}$	$[\text{m}^3_{\text{vz}} \cdot \text{kg}^{-1}]$	teoretický objem spalovacího vzduchu
$V_{\text{vz sk}}$	$[\text{m}^3_{\text{vz}} \cdot \text{kg}^{-1}]$	skutečný objem spalovacího vzduchu
V_{vzt}	$[\text{m}^3_{\text{vz}} \cdot \text{kg}^{-1}]$	teoretický objem vzduchu pro zplyňování
w_{22}	$[-]$	hmotnostní zlomek dřevoplynu
x_v	$[-]$	objemový zlomek
z_i	$[\text{m n. m.}]$	nadmořská výška
α	$[-]$	součinitel přebytku vzduchu
α_r	$[-]$	lokální součinitel přebytku vzduchu
ε	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}]$	rychlost disipace
ε_r	$[-]$	emisivita sálavého povrchu černého nátěru
λ	$[-]$	zplyňovací poměr
μ_t	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	turbulentní viskozita
ρ	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	hustota
Φ_i	$[\text{°}]$	zeměpisná šířka
ω	$[\text{s}^{-1}]$	vířivost

*dolní index i u příslušných veličin (s výjimkou nadmořské výšky z_i a zeměpisné šířky Φ_i) označuje hodnotu veličiny pro složku směsi (např. M_i – molární hmotnost složky směsi)